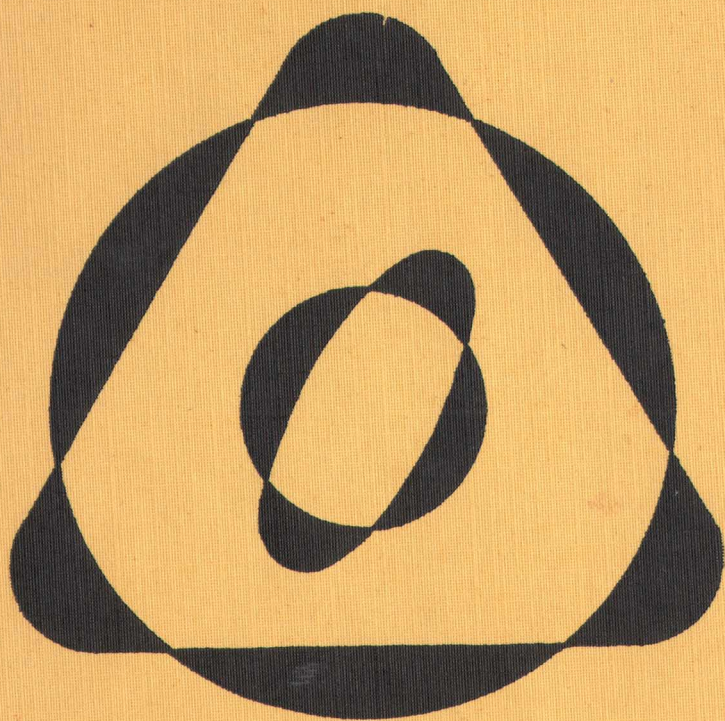




GEORGE
GAMOW

Treizeci de ani care au zguduit fizica

Istoria teoriei cuantice



Ilustrată de autor



EDITURA ȘTIINȚIFICĂ
București 1969

În românește de: I. CIUC și D. NEAGU

George Gamow
THIRTY YEARS
THAT SHOOK PHYSICS
The Story of Quantum Theory
Illustrations by the Author

Doubleday & Company, Inc.
Garden City, New York 1966

Treizeci de ani care au zguduit fizica este o lucrare care pune în evidență atât talentul artistic al Dr. Gamow, cât și capacitatea sa de a expune subiecte științifice în limbaj neprofesional. În ceea ce privește pictura, Dr. Gamow însuși a recunoscut că maestrul său este Sandro Botticelli; oricărui student în arte această carte i-ar putea oferi un interesant exercițiu suplimentar, constind în stabilirea influenței lui Botticelli în schițele de portret ale lui Max Planck (pag. 17) și Niels Bohr (pag. 38). Legătura ulterioară dintre stilul Dr. Gamow și stilul devenit recent notoriu — Pop Art — este mai lesne de recunoscut. Spiritele cu înclinații filozofice vor găsi probabil semnificativ faptul că fluxul continuu al artei de la Renașterea italiană, la cea din Madison Avenue, de la mijlocul secolului al XX-lea, își găsește expresia în lucrările unui fizician matematician, celebru pentru dezvoltarea pe care a dat-o teoriei Marelui Explozii (*Big Bang*) a creației cosmice.

Probabil că puțini sau chiar nici unul dintre fizicienii contemporani nu ar fi putut elabora o carte ca cea de față, chiar dacă ar putea scrie cu aceeași savoare și ar domina în egală măsură dificultățile științei. Cartea constituie o privire retrospectivă a unei perioade cruciale de dezvoltare in-

telectuală, scrisă de cineva care a fost o prezență activă în cadrul ei. Numele ilustre pe care le veți întâlni în paginile ce urmează au fost pentru Dr. Gamow mai mult decât niște nume; acești titani ai științei, care au recreat universul în mintea omului, au fost profesorii lui, prietenii lui și colegii lui. Împrejurările cosmopolite ale vieții lui i-au oferit marea șansă de a fi printre aceștia în momente când s-au produs multe dintre evenimentele memorabile ale acestor treizeci de ani care au zguduit fizica.

Dr. Gamow s-a născut la 4 martie 1904, la Odesa, în Rusia. Din fragedă tinerețe s-a dedicat științei și timp de un an a studiat paleontologia. După cum spunea mai târziu, această experiență l-a făcut în stare „să decesebească un dinosaur de o pisică, după forma degetului mic de la picior”. A studiat la Universitatea din Leningrad, unde a câpătat în anul 1928 titlul de doctor, și pe urmă a studiat un an la Universitatea din Göttingen, în Germania, ca bursier. În anul 1928 — 1929 a lucrat la Copenhaga cu Niels Bohr, iar în 1929 — 1930 cu Ernest Rutherford, la Laboratorul Cavendish din Cambridge, Anglia.

Dr. Gamow avea 24 de ani când a adus prima contribuție mai importantă în fizica teoretică. Concomitent, dar independent unii de alții, Gamow, fizicianul american E. U. Condon și fizicianul englez R.W. Gurney au explicat emisia particulelor alfa din nucleele radioactive, aplicând acestui proces metodele, pe atunci, noi, ale mecanicii ondulatorii. Doi ani mai târziu, în 1930, el a prezis — ceea ce s-a și adeverit — că protonii vor fi mai utili decât particulele alfa în experiențele cunoscute sub denumirea populară de „spargerea atomilor” și, în același an, a emis ideea modelului în formă de picătură pentru nucleele elementelor grele. În anul 1929, în colaborare cu R. Atkinson și F. Houtermans, a formulat teoria după care căldura și lumina solară se datoresc unor procese termonucleare, iar teoria sa asupra originii elementelor chimice bazată pe captura de neutroni a dominat gândirea cosmologică între 1940 și 1950. El a adus de asemenea contribuții la studiul problemelor de bază ale biologiei, formulind ideea că cei patru nucleotizi ai moleculei de acid dezoxiribonucleic (ADN) formează un ccd ale cărui diferite combinații joacă rolul de șablon în organizarea diferitelor molecule de aminoacizi.

Caracteristicile personale ale Dr. Gamow sînt aproape tot atît de impresionante ca şi rezultatele activităţii sale. De statură uriaşă, avînd peste 1.90 m şi peste 100 kg, el este înzestrat cu un umor şugubăţ, după cum prea bine ştiu cititorii din fanteziile d-lui Tompkins, personaj creat de el. Cînd, în 1948, împreună cu R. Alpher, un student al său, trebuiau să semneze calculele preliminare ale lucrării lor *Originea elementelor chimice*, Gamow a remarcat: „Ceva lipseşte“ şi, atribuind *in absentia* o parte din merit lui Hans Bethe, a semnat „Alpher, Bethe şi Gamow“. Dr. Gamow este un lector frecvent şi popular, vorbind şase limbi, cu un accent foarte puternic, ceea ce a făcut pe un prieten să observe că cele şase limbi constituie toate dialecte diferite ale uneia singure — ale „gamowiane“. Urme de gamowiană se găsesc din cînd în cînd şi în stilul lui literar, dar editorul care le-ar exclude fără milă s-ar dovedi a fi un pedant de cea mai rea speţă, insensibil la îmbogăţirea individuală a limbii.

Multilateralitatea Dr. Gamow, ca lingvist, cu toată pronunţarea cu accent, reflectă ţările pe care le-a parcurs în cariera lui profesională. După studiile cu Bohr şi Rutherford, el s-a reintors în Rusia ca cercetător principal la Academia de Ştiinţe din Leningrad, dar şi-a părăsit ţara natală definitiv în 1933. A ţinut lecţii la Paris şi Londra şi pe urmă la Şcoala de vară a Universităţii din Michingan, pe urmă a lucrat la Facultatea Universităţii George Washington, din Washington, în calitate de profesor de fizică, din 1934 pînă în 1956. El a devenit cetăţean al Statelor Unite în 1940 şi a lucrat în timpul celui de al doilea război mondial ca consultant al marinei, armatei şi aviaţiei şi al Comisiei de energie atomică. Din 1956 lucrează la Universitatea din Colorado, Boulder.

Dr. Gamow a scris multe articole de specialitate şi o carte de specialitate, *Nucleul atomic* (Oxford University Press, 1931, revăzută în 1937 şi în 1949). Activitatea sa de popularizare cuprinde numeroase articole în revista „Scientific American“ şi următoarele cărţi:

Mr. Tompkins in Wonderland (Dl. Tompkins în ţara minunilor), Cambridge University Press, 1939;

Mr. Tompkins Explores the Atom (Dl. Tompkins explorează atomul), Cambridge University Press, 1943;

Mr. Tompkins Learns the Facts of Life (Dl. Tompkins învață adevărurile vieții), Cambridge University Press, 1953;
Atomic Energy in Cosmic and Human Life (Energia atomică în viața cosmosului și a omului), Cambridge University Press, 1945;

The Birth and Death of the Sun (Nașterea și moartea Soarelui), Viking Press, 1941;

Biography of the Earth (Biografia Pământului), Viking Press, 1943;

One, Two, Three... Infinity (Unu, doi, trei... infinit), Viking Press, 1952 (Editura Tineretului, București, 1958);

Creation of the Universe (Formarea Universului), Viking Press, 1952;

Puzzle—Math (Enigme matematice) în colaborare cu M. Stern, Viking Press, 1958, (Editura Științifică, București, 1961);

The Moon (Luna), H. Schumann, 1953;

Matter, Earth and Sky (Materie, Pământ și Cer), Prentice-Hall, 1958; ed. 2, 1965;

Physics: Foundation and Frontiers (Fizica: bazele și limitele ei) în colaborare cu J. Cleveland, Prentice-Hall, 1960;

Atom and Its Nucleus (Atomul și nucleul său), Prentice-Hall, 1961;

Biography of Physics (Biografia fizicii), Harper and Brothers, 1961, (în curs de apariție și în Editura Științifică);

A Star Called the Sun (O stea numită Soare), Viking Press, 1965, (Editura Științifică, 1969);

A Planet Called the Earth (O planetă numită Pământ), Viking Press, 1965, (Editura Științifică, 1968).

El a început să ilustreze singur cea de-a doua carte din seria *Dl. Tompkins*, deoarece cel de-al doilea război mondial a întrerupt colaborarea sa cu pictorul englez cu care a lucrat la ilustrarea primei cărți din seria *Dl. Tompkins*. În 1956, a primit de la UNESCO „Premiul Kalinga” pentru lucrările sale de popularizare a științei pentru cititorii neprofesioniști.

Dr. Gamow este membru al Academiei Regale de Științe daneze și al Academiei Naționale de Știință a Statelor Unite.

JOHN H. DURSTON

PREFAȚĂ

Două mari teorii au revoluționat fizica în primele decenii ale secolului al XX-lea: *teoria relativității* și *teoria cuantică*. Prima a fost în esență creația unui singur om, a lui Albert Einstein, și a apărut în două etape: teoria relativității restrinse, publicată în 1905, și teoria relativității generale, publicată în 1915. Teoria relativității a implicat o modificare radicală a noțiunilor clasice newtoniene de spațiu și timp, ca două mărimi independente în descrierea lumii fizice, și a condus la viziunea unei lumi cuadridimensionale, în care timpul este considerat ca o a patra coordonată, deși nu este în întregime echivalentă cu cele trei coordonate spațiale. Teoria relativității a introdus modificări importante în tratarea mișcării electronilor în atomi, a mișcării planetelor în sistemul solar și a mișcării galaxiilor în univers.

Teoria cuantică, dimpotrivă, este creația citorva mari oameni de știință, începînd cu Max Planck, care a introdus în fizică noțiunea de cuantă de energie. Teoria cuantică a parcurs cîteva stadii și în prezent oferă o înțelegere adîncă atât a structurii atomilor și a nucleelor atomice cît și a corpurilor cu dimensiuni familiare nouă în urma experienței de toate zilele. În prezent, teoria cuantică nu este încă încheiată; în special în relațiile ei cu teoria relativității și în

problema particulelor elementare; dezvoltarea ei s-a oprit (temporar), izbindu-se de dificultăți considerabile.

Această carte va expune dezvoltarea teoriei cuantice. Autorul a făcut cunoștință cu ideea de cuantă și cu modelul atomic al lui Bohr la vîrsta de 18 ani, cînd a intrat ca student la Universitatea din Leningrad. Ulterior, la vîrsta de 24 ani, a avut norocul de a deveni studentul lui Bohr, la Copenhaga. De-a lungul anilor memorabili de la *paa Blegdamsvej* (adresa institutului lui Bohr) el a avut ocazia să se întâlnească cu mulți dintre oamenii de știință care au contribuit la dezvoltarea inițială a teoriei cuantice și de a lua parte la discuțiile lor. Expunerea care urmează este o sinteză a acestor experiențe, centrată pe marea și amicala figură a lui Niels Bohr. Autorul speră că generația nouă de fizicieni va găsi în paginile ce urmează unele informații interesante.

GEORGE GAMOW

Ianuarie 1965

Începutul secolului al XX-lea a anunțat o eră fără precedent, în care teoriile clasice, teorii care au dominat fizica încă din timpurile pre-newtoniene, au fost reevaluate și răsturnate. Luînd cuvîntul la 14 decembrie 1900, la o ședință a Societății germane de fizică, Max Planck a arătat că paradoxele care abundă în teoria clasică a emisie și absorbției luminii de către corpurile materiale ar putea fi înlăturate dacă s-ar presupune că *energia radiantă poate exista numai în formă de porții discrete*. Planck a denumit aceste porții *cuante de lumină*. Cinci ani mai târziu, *Albert Einstein* a aplicat cu succes ideea cuantelor de lumină pentru a explica legile empirice ale efectului fotoelectric, adică emisia electronilor de către suprafețele metalice iluminate cu lumină violetă și ultravioletă. Ceva mai târziu *Arthur Compton* a făcut experiențele sale clasice, care au arătat că difracția razelor X de către electronii liberi are loc după aceeași lege ca și ciocnirea dintre două sfere elastice. Și astfel, în cîțiva ani, noua idee a cuantificării energiei radiante s-a instalat ferm atît în fizica teoretică, cît și în cea experimentală.

În anul 1913, fizicianul danez *Niels Bohr* a extins ideea lui Planck a cuantificării energiei radiante la descrierea

energiei mecanice a electronilor din atom. Introducând „reguli de cuantificare“ specifice pentru sistemele mecanice de dimensiunile atomului, el a reușit să dea o interpretare logică modelului planetar al atomului al lui Ernst Rutherford, model care avea o foarte serioasă bază experimentală, dar care, pe de altă parte, contrazicea net toate noțiunile fundamentale ale fizicii clasice. Bohr a calculat energiile corespunzătoare diferitelor stări cuantice discrete ale electronilor atomici și a interpretat emisia de lumină ca expulzare a unei cuante de lumină avînd o energie egală cu diferența energiilor stărilor cuantice inițiale și finale ale electronului atomic. Calculele sale erau în stare să explice în amănunțime liniile spectrale ale hidrogenului și ale elementelor mai grele, o problemă care chinase pe spectroscopiști timp de decenii. Prima lucrare a lui Bohr asupra teoriei cuantice a atomului a avut efectul unui cataclism. În cursul unui deceniu, datorită eforturilor unite ale fizicienilor din multe țări, atît teoreticieni cit și experimentatori, au fost înțelese pînă în detaliu proprietățile optice, magnetice și chimice ale diferiților atomi. Dar pe măsură ce anii treceau, devenea din ce în ce mai clar că teoria lui Bohr, cu toate succesele ei, nu era încă o teorie definitivă, deoarece nu era în stare să explice unele din faptele cunoscute despre atomi. De exemplu, ea nu reușea să descrie procesul de tranziție a unui electron de la o stare cuantică la alta, și nu exista nici o posibilitate de a calcula intensitatea diverselor linii ale spectrelor optice.

În anul 1925, un fizician francez, *Louis de Broglie*, a publicat un articol în care a dat o explicație cu totul neașteptată orbitelor cuantice ale lui Bohr. După de Broglie, mișcarea fiecărui electron este guvernată de o misterioasă *undă-pilot*, a cărei viteză de propagare și lungime de undă depind de viteza electronului respectiv. Presupunînd că lungimea acestor unde-pilot este invers proporțională cu viteza electronului, de Broglie a reușit să arate că diversele orbite cuantice ale modelului lui Bohr ale atomului de hidrogen sînt tocmai acelea care pot cuprinde un *număr întreg* de unde pilot. În felul acesta modelul atomului a început să arate ca un fel de instrument muzical cu un ton de bază (orbita fundamentală cu energia cea mai mică) și diferite armonice (descriind orbite cu energii mai mari). Un an de la publicare,

ideile lui de Broglie au fost extinse și puse într-o formă matematică mai riguroasă de către fizicianul austriac *Erwin Schrödinger*, a cărui teorie a devenit cunoscută sub numele de *mecanică ondulatorie*. Explicînd toate fenomenele atomice pe care le explica și teoria lui Bohr, mecanica ondulatorie explica totodată și acele fenomene pe care teoria lui Bohr nu reușea să le explice (ca intensitățile liniilor spectrale etc.) și, în plus, prezicea cîteva fenomene noi (ca de exemplu difracția unui fascicul de electroni) care nu fuseseră nici măcar visate în cadrul fizicii clasice sau în cadrul teoriei cuantice a lui Planck-Bohr. Mecanica ondulatorie oferea de fapt o teorie completă și absolut coerentă a tuturor fenomenelor atomice și putea să explice, așa cum au arătat următoarele două decenii, atît fenomenele dezintegrării radioactive cit și transformările nucleare artificiale.

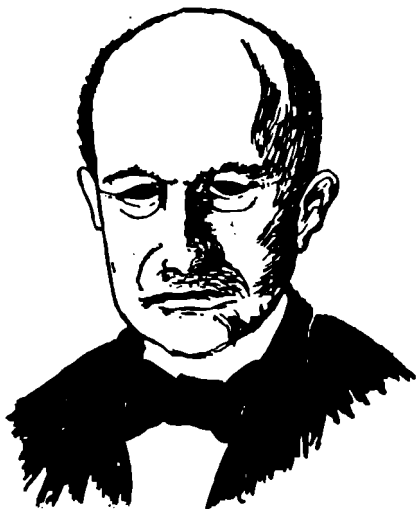
Simultan cu articolul lui Schrödinger cu privire la mecanica ondulatorie a apărut și articolul unui tînăr fizician german, *Werner Heisenberg*, care a dezvoltat tratarea problemelor cuantice utilizînd așa-numita „algebră necomutativă”, o disciplină matematică în care $a \times b$ nu este în mod necesar egal cu $b \times a$. Apariția simultană a articolelor lui Schrödinger și Heisenberg în două reviste germane diferite („Ann. der Phys.” și „Zeitsch. für Phys.”) a uluit lumea fizicii teoretice. Aceste două articole arătau pe cît se poate de diferit, dar conduceau la exact aceleași rezultate în ceea ce privește spectrele și structura atomilor. Și a trebuit mai mult de un an pînă cînd s-a stabilit că cele două teorii erau din punct de vedere fizic identice, ele fiind doar exprimate în două forme matematice complet diferite. Era ca și cum America ar fi fost descoperită de Columb, care străbătea Oceanul Atlantic plutind spre vest, și de un japonez la fel de îndrăzneț, care străbătea Oceanul Pacific plutind spre est.

În buchetul teoriei cuantice însă rămînea încă un spin ascuțit, un spin care se făcea simțit în mod dureros ori de cîte ori se încerca cuantificarea sistemelor mecanice, care datorită vitezelor mari pe care le implicau (apropriate de viteza luminii) cereau o tratare relativistă. Multe încercări de a reuni teoria relativității cu teoria cuantică au rămas infructuoase pînă cînd, în cele din urmă, în 1929, un fizician englez, *P.A.M. Dirac*, a scris faimoasa sa *Ecuatie de undă relativistă*. Soluțiile acestei ecuații dădeau o descriere

perfectă a mișcărilor electronilor atomici la viteze apropiate de cea a luminii și ofereau automat ca un fel de supliment neașteptat, explicația impulsurilor, momentelor cinetice liniare, mecanice și unghiulare și a celor magnetice ale acestora. Anumite dificultăți formale legate de manipularea acestei ecuații i-au sugerat lui Dirac ideea că alături de electronii obișnuiți încărcăți negativ *trebuie să existe de asemenea și anti-electroni, încărcăți pozitiv*. Previziunea acestuia a fost confirmată în mod strălucit cîțiva ani mai tîrziu, cînd anti-electronii au fost găsiți în razele cosmice. Teoria *antiparticulelor* a fost extinsă și la alte particule elementare, în afara electronilor, și astăzi avem anti-protoni, anti-neutroni, anti-mezoni etc.

Și astfel, prin 1930, la numai trei decenii după memorabila comunicare a lui Planck, teoria cuantică a căpătat acea formă finală care astăzi ne este familiară. În deceniile care au urmat acestor dezvoltări, elaborate cu o viteză care tăia respirația, s-au făcut foarte puține progrese teoretice. Pe de altă parte însă, acești din urmă ani au fost foarte fructuoși în domeniul studiilor experimentale, în special în ceea ce privește investigarea numeroaselor particule elementare nou descoperite. Sîntem încă în așteptarea unei străpungeri a solidului zid de dificultăți care ne împiedică să înțelegem existența însăși a particulelor elementare, masele, sarcinile, momentele magnetice și interacțiunile acestora. Este în afara oricărei îndoieli că atunci cînd această străpungere se va realiza, ea va implica noțiuni noi care se vor deosebi de acelea de astăzi tot atît pe cît se deosebesc noțiunile de azi de cele ale fizicii clasice.

În capitolele care urmează, vom încerca să descriem dezvoltarea de-a lungul primelor trei decenii de creștere turbulentă a teoriei cuantice a energiei și materiei, subliniind diferențele conceptuale dintre „buna și bătrîna” fizică clasică și noul aspect pe care l-a luat fizica în secolul al XX-lea.



M. PLANCK
ȘI CUANTELE
DE LUMINĂ

Ideea revoluționară a lui Max Planck care afirmă că lumina poate fi emisă și absorbită numai sub forma unor anumite porții discrete de energie își are rădăcinile în studiile mult mai vechi ale lui Ludwig Boltzmann, James Clerk Maxwell, Josiah Willard Gibbs și ale altora privind descrierea statistică a proprietăților termice ale corpurilor materiale. Teoria cinetică a căldurii consideră căldura ca fiind rezultatul mișcării haotice a numeroaselor molecule individuale din care sînt formate corpurile materiale. Deoarece este imposibil (și de asemenea lipsit de finalitate) să urmărim mișcarea fiecărei molecule individuale participante la mișcarea termică, descrierea matematică a fenomenului căldurii trebuie să utilizeze în mod necesar metode statistice. După cum economistul planificator nu-și bate capul să cunoască exact cîte hectare a semănat fermierul John Doe sau cîți porci posedă acesta, fizicianul nu se interesează de poziția și viteza unei molecule din gaz, care este format dintr-un număr foarte mare de molecule individuale. Tot ce contează, ca și tot ce prezintă importanță pentru economia unei țări sau pentru comportarea macroscopică a unui gaz, sînt valorile medii luate pe un număr mare de fermieri, respectiv molecule.

Una din legile de bază ale *mecanicii statistice*, care comportă studiul valorilor medii ale proprietăților fizice ale unor ansambluri foarte mari de particule individuale aflate în mișcare haotică, este așa-numita *teoremă a echipartiției*, care poate fi dedusă matematic din legile mecanicii newtoniene. Aceasta afirmă: *energia totală conținută de ansamblul unui număr mare de particule individuale, care fac schimb de energie între ele prin ciocniri mutuale, este distribuită egal (în medie) pe toate particulele*. Dacă toate particulele sînt identice, ca de exemplu, în cazul unui gaz pur, ca oxigenul sau neonul, toate particulele vor avea în medie viteze egale și energii cinetice egale. Notînd cu E energia totală disponibilă în sistem și cu N numărul total al particulelor, putem afirma că energia medie pe particulă este E/N . Dacă avem un amestec de diferite tipuri de particule, ca de exemplu în cazul mixturii a două sau mai multor gaze diferite, moleculele mai masive vor avea viteze mai mici, astfel că energiile lor cinetice (proportionale cu masa și cu pătratul vitezei) vor fi în medie aceleași cu cele ale moleculelor mai ușoare.

Să considerăm, de exemplu, un amestec de hidrogen și oxigen. Moleculele de oxigen care sînt de 16 ori mai grele decît cele de hidrogen, vor avea în medie viteze de $\sqrt{16} = 4$ ori mai mici decît acestea din urmă¹.

În timp ce legea de echipartiție guvernează distribuția medie a energiilor pe membrii unei mulțimi mari de particule, vitezele și energiile particulelor individuale pot să se deosebească de cele medii, fenomen care este cunoscut sub numele de *fluctuații statistice*. Și fluctuațiile pot fi tratate matematic, curbele care rezultă arătînd numărul relativ de particule care au viteze mai mari sau mai mici decît cea medie pentru temperatura dată. Astfel de curbe, calculate pentru prima oară de J. Clerk Maxwell și purtînd numele său, sînt arătate în fig. 1, pentru trei temperaturi diferite ale gazului. Folosirea metodelor statistice în studiul mișcării termice a moleculelor a dat rezultate fructuoase în explicarea proprietăților termice ale corpurilor materiale, în special

¹ Deoarece energia cinetică este produsul $m v^2$, adică dintre *masă* și *pătratul vitezei*, acest produs va rămîne același dacă masa crește cu 16, iar viteza scade de patru ori. Într-adevăr, $4^2 = 16$.

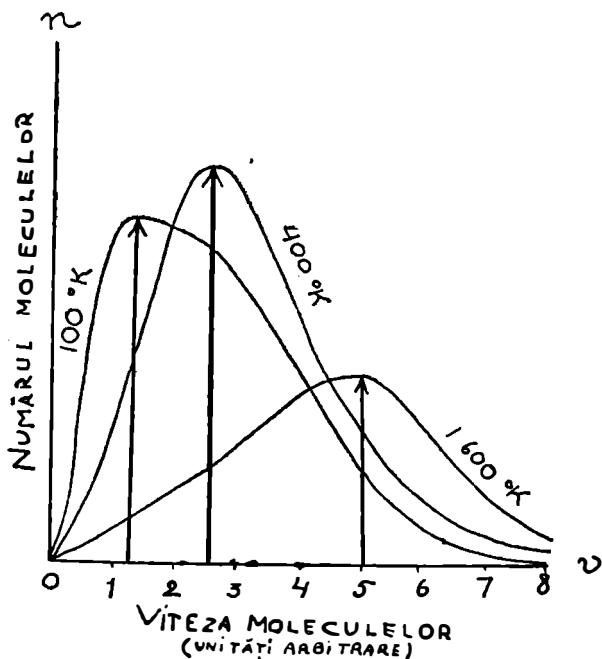


FIG. 1.

Distribuția maxwelliană: numărul moleculelor care au viteze diferite v este reprezentat funcție de aceste viteze pentru trei temperaturi diferite, 100° , 400° și 1600° K. Deoarece numărul moleculelor în vas rămâne constant, suprafețele subscrise de aceste curbe sînt egale. Vitezele medii ale moleculelor cresc proporțional cu rădăcina pătrată a temperaturii absolute.

în cazul gazelor; în cazul aplicării la gaze, teoria este mult simplificată datorită faptului că moleculele de gaz zboară liber prin spațiu în loc de a fi împachetate strîns împreună, ca în lichide și solide.

MECANICA STATISTICĂ ȘI RADIAȚIA TERMICĂ

Spre sfîrșitul secolului al XIX-lea, lordul Rayleigh și Sir James Jeans au încercat să extindă metoda statistică, atît de folositoare în înțelegerea proprietăților termice ale cor-

purilor materiale, la problema radiației termice. Toate corpurile materiale încălzite emit unde electromagnetice de diferite lungimi de undă. Când temperatura este relativ scăzută — de exemplu, punctul de fierbere al apei — lungimea de undă predominantă în radiația emisă este relativ mare. Aceste unde nu impresionează retina ochiului nostru (adică sint invizibile), dar sint absorbite de pielea noastră, producând senzația de căldură; ca urmare se vorbește de căldură sau de *radiație infraroșie*. Atunci când temperatura crește la circa 600°C (temperatură caracteristică pentru dispozitivele de încălzire electrice) se observă o lumină slabă roșie. La $2\,000^{\circ}\text{C}$ (corespunzătoare filamentului unui bec electric) are loc emisia unei lumini strălucitoare albe, care conține toate lungimile de undă ale *spectrului radiației vizibile*, de la roșu la violet. La temperatura și mai ridicată a arcului electric, la $4\,000^{\circ}\text{C}$, începe să fie emisă o cantitate considerabilă de *radiație ultravioletă*, a cărei intensitate crește rapid cu creșterea ulterioară a temperaturii. Pentru fiecare temperatură dată există o frecvență de oscilație predominantă a cărei intensitate este maximă și pe măsură ce temperatura crește, crește și această frecvență predominantă. Situația este reprezentată grafic în fig. 2, care dă distribuția intensității spectrelor corespunzătoare la trei temperaturi diferite.

Comparind curbele din fig. 1 și 2, remarcăm o similitudine calitativă remarcabilă. În timp ce în primul caz creșterea temperaturii duce la deplasarea maximumului curbei spre viteze moleculare mai mari, în al doilea caz duce la deplasarea maximumului spre frecvențe de radiații mai mari. Această similitudine i-a îndemnat pe Rayleigh și Jeans să utilizeze în cazul radiației termice același principiu de echipartiție, care s-a dovedit a fi atât de fructuos în cazul gazelor; adică să presupună că toată energia de radiație disponibilă este egal distribuită pe toate frecvențele de oscilație posibile. Încercarea a condus însă, vai, la rezultate catastrofale! Necazul venea de acolo că în ciuda tuturor similitudinilor, între un gaz format din molecule discrete și o radiație termică formată din oscilații electromagnetice există totuși o diferență categorică: în timp ce numărul de molecule de gaz într-un recipient dat este totdeauna finit, deși în mod obișnuit foarte mare, numărul oscilațiilor electromagnetice posibile în același recipient este totdeauna infinit. Pentru a

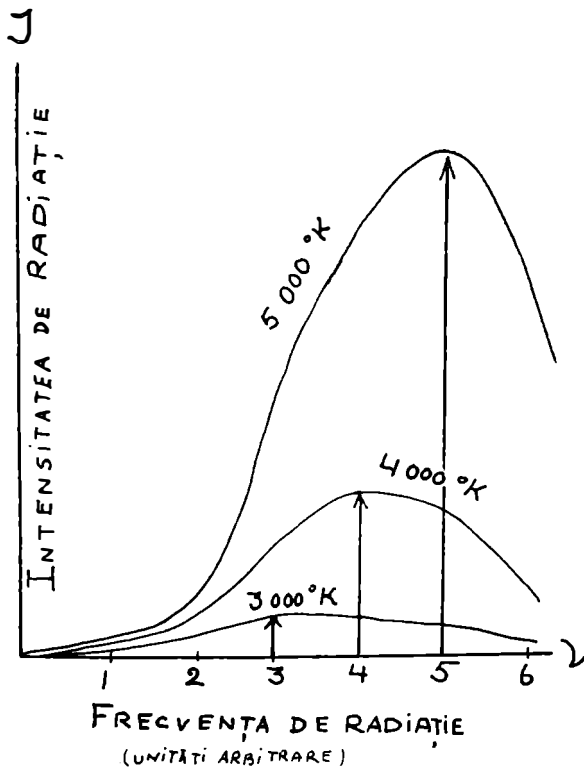


FIG. 2.
Distribuția observată a intensităților radiației pentru diferite frecvențe (ν) este trasată funcție de frecvență. Deoarece energia radiată de fiecare unitate de volum crește cu puterea a patra a temperaturii absolute T , suprafețele de sub curbe cresc. Frecvența corespunzătoare maximumului de intensitate crește proporțional cu temperatura absolută.

înțelege această afirmație trebuie să ne reamintim că tabloul mișcării ondulatorii, să zicem într-un cub, este format prin suprapunerea diferitelor unde staționare care au nodurile lor pe pereții cubului.

Situația poate fi vizualizată mai ușor în cazul mai simplu al unei mișcări ondulatorii unidimensionale, ca de exemplu, în cazul unei corzi fixate la ambele capete. Deoarece cape-

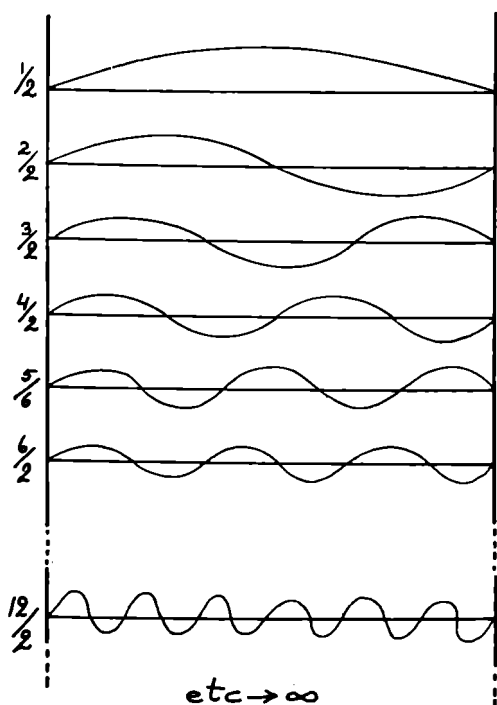


FIG. 3.

Tonul de bază și armonicile superioare în cazul unui continuu monodimensional — de exemplu, în cazul unei coarde de vioară.

tele corzii nu se pot mișca, singurele oscilații posibile sînt acelea arătate în fig. 3, care corespund, în termeni muzicali, la tonul fundamental și la diferitele armonice ale corzii oscilante. Pe întreaga lungime a corzii se poate înscrie o semiundă, două semiunde, trei semiunde, zece semiunde, ... o sută, o mie, un milion, un bilion... orice număr de semiunde. Frecvențele de oscilații corespunzătoare diverselor armonice vor fi dublul, triplul... de zece ori, de o sută de ori, de un milion de ori, de un bilion de ori... etc., frecvența tonului de bază.

În cazul undelor staționare în interiorul unui recipient tridimensional, ca de exemplu un cub, situația va fi similară,

deși ceva mai complicată, rezultând într-un număr nelimitat de diferite oscilații cu lungimi de undă din ce în ce mai scurte și corespunzător cu frecvențe din ce în ce mai înalte. Astfel că, dacă E este întreaga cantitate de energie radiantă disponibilă în recipient, principiul de echipartiție conduce la concluzia că fiecărei oscilații individuale îi revine o cantitate de energie E/∞ , o cantitate infinit mică de energie! Caracterul paradoxal al acestei concluzii este evident, dar noi putem să îl subliniem și mai puternic prin următoarele considerații.

Să presupunem că avem un recipient cubic, cunoscut drept „cubul lui Jeans”, care are pereții interiori făcuți din oglinzi ideale, oglinzi care reflectă sută la sută lumina ce cade pe ele. Desigur, astfel de oglinzi nu există și nici nu pot fi fabricate; chiar cele mai bune oglinzi absorb o mică fracțiune din lumina incidentă. În discuțiile teoretice însă, noțiuni ca acestea, de oglinzi ideale, pot fi folosite drept caz limită al unor oglinzi foarte bune. Acest mod de a raționa, cînd *gîndim* care ar fi rezultatul unei experiențe cu astfel de oglinzi ideale, suprafețe fără frecare, bare fără greutate etc., se cunoaște sub numele de „experiment mental” (termenul original *Gedankenexperiment* și este adesea folosit în diferitele ramuri ale fizicii teoretice. Dacă într-un astfel de cub al lui Jeans perforăm într-unul din pereți un mic orificiu și trimitem în interior o cantitate oarecare de lumină, după care închidem orificiul ideal, lumina va rămîne în interior pentru un timp indefinit, fiind reflectată de la un perete la altul de oglinzile ideale. Dacă, ceva mai tîrziu, redeschidem orificiul, vom observa sclipirea luminii care iese. Situația este în principiu identică cu aceea în care se pompează o cantitate oarecare de gaz într-un recipient oarecare, închis, și care este eliberată din nou ceva mai tîrziu. Hidrogenul gazos poate rămîne un timp indefinit într-un recipient de sticlă, fiind un caz ideal. Hidrogenul însă nu va rămîne mult timp într-un container făcut din metalul paladiu, deoarece se cunoaște că moleculele de hidrogen difuzează relativ ușor prin acest material. De asemenea, nu se poate utiliza un recipient de sticlă pentru a păstra acidul fluorhidric, deoarece acesta reacționează chimic cu pereții de sticlă. În fine, cubul lui Jeans cu pereții lui din oglinzi ideale nu este un lucru chiar așa de fantastic!

Există, totuși, o diferență între gazul și radiația închise în recipient. Deoarece moleculele nu sînt puncte matematice, ci au anumite diametre finite, ele suferă numeroase ciocniri în cadrul cărora poate avea loc schimbul de energie. Dacă noi, de exemplu, vom injecta într-un recipient o cantitate oarecare de gaz cald și una de gaz rece, ciocnirile mutuale dintre molecule vor coborî repede viteza celor rapide și o vor crește pe a celor lente, rezultînd o distribuție egală a energiei, în conformitate cu principiul echipartiției. În cazul unui gaz ideal, format din molecule-puncte, care desigur în natură nu există, ciocnirile mutuale nu vor avea loc și fracțiunea caldă a gazului va rămîne caldă, în timp ce fracțiunea rece va rămîne rece. Schimbul de energie dintre moleculele unui gaz ideal poate fi totuși stimulat prin introducerea în recipient a uneia sau a mai multor particule cu diametre mici dar finite (particule browniene). Ciocnindu-se cu acestea, moleculele punctidimensionale rapide vor transmite acestora energia lor, care la rîndul ei va fi transmisă celorlalte molecule punctidimensionale lente.

În cazul undelor luminoase, situația este diferită, deoarece două unde luminoase care își încrucișează drumurile nu-și influențează reciproc propagarea² cu nimic. Așa că, pentru a provoca schimbul de energie între undele staționare de lungimi diferite, va trebui să introducem în recipient mici corpuri care să poată absorbi și reemite toate lungimile de undă posibile, permițînd în felul acesta schimbul de energie între toate oscilațiile posibile. Corpurile negre obișnuite, ca de exemplu mîngalul, posedă această proprietate, cel puțin în partea vizibilă a spectrului, și noi putem imagina „corpuri negre ideale” care să se comporte în același mod în cazul tuturor lungimilor de undă posibile. Introducînd în cubul lui Jeans cîteva particule de praf de cărbune ideal, vom rezolva prin urmare problema schimbului de energie.

Să realizăm acum un experiment mental, injectînd într-un cub al lui Jeans, inițial vid, o cantitate oarecare de

² Pentru a evita obiecțiile din partea acelor cititori care cunosc mai mult decît e necesar pentru înțelegerea acestei discuții, autorul se grăbește să afirme că, în concordanță cu electrodinamica cuantică modernă trebuie să ne așteptăm la o oarecare difracție a luminii de către lumină, datorită formării de perechi de electroni virtuali. Jeans și Planck nu cunoșteau însă aceasta.

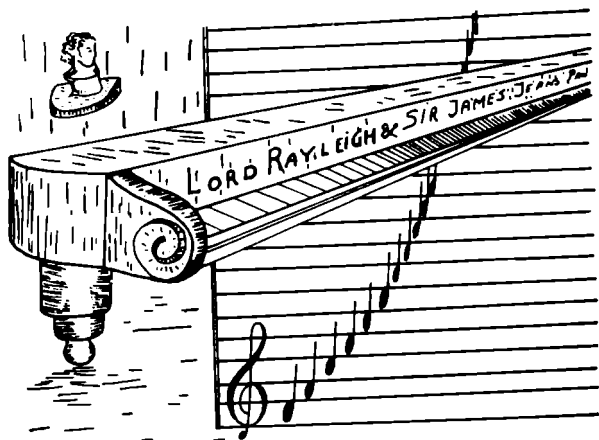


FIG. 4.

Un pian cu un număr nelimitat de clape, extinzându-se în regiunea ultrasonoră, pînă la frecvențe infinite. Legea de echipartiție ar cere ca toată energia transmisă de un muzician uneia din clapele de joasă frecvență să călătorească tot drumul, spre regiunea ultrasonoră, în afara domeniului audio!

radiații de o lungime de undă dată — fie o cantitate oarecare de lumină roșie. Imediat după injecție, interiorul cubului va conține numai unde staționare roșii care se întind de la un perete la altul, toate celelalte moduri de oscilație fiind absente. E ca și cum am lovi pe un pian mare o singură clapă. Dacă, așa cum se întîmplă de obicei în practică, are loc doar un schimb foarte slab de energie între diferitele părți ale instrumentului, tonul va continua să răsunе pînă cînd întreaga energie comunicată corzii va fi disipată prin amortizare. Dacă însă, prin armătura de care corzile sînt fixate, există o scurgere de energie între corzi, vor începe să vibreze și celelalte corzi pînă cînd, potrivit teoremei de echipartiție, toate cele 88 de corzi vor avea energii egale cu $1/88$ din energia totală comunicată.

Dar, pentru ca un pian să reprezinte o analogie suficient de bună cu cubul lui Jeans, el trebuie să posede mult mai multe clape care să se extindă la infinit în dreapta, în regiunea ultrasonoră (fig. 4). În felul acesta, energia transmisă unei

corzi din regiunea sonoră va călători spre dreapta în regiunea tonurilor înalte și se va pierde în regiunile infinit îndepărtate ale vibrațiilor ultrasonore, încît o bucată muzicală cîntată pe un astfel de pian se transformă într-un șuierat ascuțit. În mod asemănător, *energia luminii roșii injectate în cubul lui Jeans se va transforma în lumină albastră, violetă, ultravioletă, în raze X, în raze γ , ș.a.m.d. fără vreo limită.* Ar fi temerar să stai în fața unui cămin, deoarece lumina roșie radiată de prietenosii cărbuni aprinși s-ar transforma rapid în radiația de înaltă frecvență, periculoasă, a produselor de fisiune!

Scurgerea de energie în regiunea sunetelor înalte nu reprezintă un pericol real pentru concertele pianiștilor, nu numai pentru că numărul clapelor este limitat spre dreapta, ci în cea mai mare măsură pentru că, așa cum s-a menționat mai înainte, oscilația fiecărei corzi este amortizată prea repede ca să mai permită transferul chiar al unei părți mici a energiei corzii vecine. În cazul energiei radiante, situația este însă mult mai serioasă și dacă legea de echipartiție ar fi valabilă și în cazul acesta, ușița deschisă a unui boiler ar constitui o sursă excelentă de raze X și raze γ . Este evident că ceva trebuie să nu fie în regulă în raționamentele fizicii secolului XIX și că este necesar să se introducă niște modificări substanțiale pentru a evita Catastrofa Ultravioletă, prevăzută teoretic, și care nu apare niciodată în realitate.

MAX PLANCK ȘI CUANTA DE ENERGIE

Problema termodinamicii radiației a fost rezolvată de Max Planck, care a fost un fizician sută la sută clasic (fapt pentru care nu poate fi blamat). El este acela care a inițiat ceea ce astăzi se cunoaște ca *fizică modernă*. La începutul secolului, la o ședință a Societății germane de fizică, din 14 decembrie 1900, Max Planck și-a expus ideile sale asupra acestui subiect, idei care erau atît de neobișnuite și de grotești încît lui însuși îi venea foarte greu să creadă în ele, cu toate că acestea au provocat o emoție intensă a auditoriului și în întreaga lume a fizicii.

Max Planck s-a născut la Kiel, în 1858, și ulterior s-a mutat cu familia la München. El a terminat Gimnaziul Maxi-

milian (cursul superior) la München, pe urmă a intrat la Universitatea din München, unde a studiat timp de trei ani fizica. Anul următor și l-a petrecut la Universitatea din Berlin, unde i-a cunoscut pe marii fizicieni ai timpului respectiv, Herman von Helmholtz, Gustav Kirchhoff și Rudolph Clausius și a învățat multe despre teoria căldurii, cunoscută în tehnică sub numele de termodinamică. Revenind la München, el a susținut teza de doctorat despre Principiul al doilea al termodinamicii, câpătînd titlul de doctor în anul 1879, apoi a devenit asistent universitar la această universitate. Șase ani mai tîrziu a acceptat postul de conferențiar la Kiel. În 1889 s-a mutat, în calitate de conferențiar, la Universitatea din Berlin unde a devenit în 1892 profesor. Această poziție constituia la timpul respectiv cel mai înalt post academic în Germania, și Planck l-a păstrat pînă la retragerea sa, la vîrsta de 70 de ani. După retragere el a continuat să activeze și a publicat pînă la moartea sa, survenită la aproape 90 de ani. Două din ultimele sale articole (*Autobiografie științifică* și *Noțiunea de cauzalitate în fizică*) au fost publicate în 1947, anul morții sale.

Planck a fost un profesor german, tipic pentru timpul său, serios și probabil pedant, dar nu lipsit de un cald simțămînt uman, după cum se vede din corespondența sa cu Arnold Sommerfeld, care, continuînd opera lui Niels Bohr, aplica teoria cuantică la structura atomului. Referindu-se la cuantă ca la noțiunea lui Planck, Sommerfeld i-a scris într-o scrisoare:

Tu ai cultivat terenul cel virgin
Iar truda-mi fu doar florile să string

la care Planck a răspuns:

Cules-ai flori — și eu la fel făcut-am!
Acum să punem florile cu toate împreună,
Și schimb prietenesc făcînd cu ele,
Strălucitoare, să-mpletim, o unică cunună!³

Pentru succesele sale științifice Max Planck a primit multe onoruri academice. În 1894 el a devenit membru al Academiei prusiene de știință și în 1926 a fost ales membru al

³ M. PLANCK. *Scientific Autobiography*, (Trad. engleză de F. Gaylor), New-York, Philosophical Library, 1949.

Societății Regale din Londra. Și, deși nu a avut nici o contribuție în astronomie, unul din noii asteroizi descoperiți a fost denumit, în cinstea sa, „Planckiana“.

În tot timpul vieții, Max Planck a fost preocupat aproape exclusiv de problemele termodinamicii și nenumăratele articole pe care le-a publicat au fost suficient de importante ca să-i aducă poziția de onoare de profesor la Berlin, la vîrsta de 34 de ani. Dar adevăratul moment de explozie în opera sa științifică, descoperirea *cuantei de energie*, penru care a primit în anul 1918 Premiul Nobel, a survenit într-o perioadă oarecum mai tîrzie a vieții lui: la vîrsta de 42 de ani. Dar 42 de ani nu reprezintă așa de mult în viața unui om, în scurgerea uzuală a ocupațiilor sau profesiilor; în domeniul fizicii teoretice însă se întîmplă, de regulă, ca cele mai importante lucrări să fie realizate în jurul vîrstei de 25 de ani, vîrstă pînă la care se poate ști destul despre teoriile existente și la care mintea este încă suficient de mobilă ca să poată concepe idei noi, îndrăznețe, revoluționare. Astfel, de pildă, Isaac Newton a elaborat legea gravitației universale la vîrsta de 23 de ani; Albert Einstein a creat teoria relativității la vîrsta de 26 de ani; iar Niels Bohr și-a publicat teoria asupra structurii atomului la vîrsta de 27 de ani. În scurtul lui drum și autorul acestei cărți și-a publicat lucrarea cea mai importantă, asupra transformărilor naturale și artificiale ale nucleelor atomice, la vîrsta de 24 de ani. În comunicarea sa, Planck afirmă că în concordanță cu calculele sale destul de complicate, concluziile paradoxale obținute de Rayleigh și Jeans pot fi depășite și pericolul catastrofei ultraviolete evitat, *dacă se postulează că energia undelor electromagnetice (inclusiv a celor luminoase) poate exista numai în forma unor porții discrete, sau cuante, conținutul în energie al fiecărei porții fiind direct proporțional cu frecvența corespunzătoare.*

Considerațiile teoretice în domeniul fizicii statistice sînt de o dificultate notorie, dar cercetînd graficele din fig. 5 se poate obține o oarecare idee despre modul în care postulatul lui Planck „descurajează“ energia radiantă de a se strecura în regiunea nelimitată a frecvențelor înalte ale spectrului.

În graficul respectiv, frecvențele posibile într-un cub „monodimensional“ al lui Jeans sînt amplasate pe axa absciselor și notate 1, 2, 3, 4 etc.; pe axa ordonatelor sînt

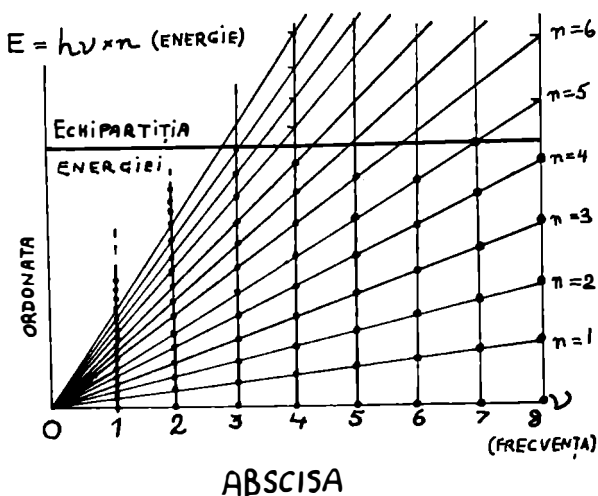


FIG. 5.

Dacă, în conformitate cu ipoteza lui Planck, energia corespunzătoare fiecărei frecvențe ν trebuie să fie un multiplu întreg al cantității $h\nu$, situația este complet diferită de cea arătată în diagramele anterioare. De exemplu, pentru $\nu = 4$ sînt opt stări de oscilație posibile, în timp ce pentru $\nu = 8$ sînt doar patru. Restricția reduce numărul de oscilații posibile la frecvențe înalte și anulează paradoxul lui Jeans.

amplasate energiile de oscilație care pot fi afectate fiecărei frecvențe posibile. Potrivit fizicii clasice, este permisă orice valoare a energiei (adică orice punct de pe verticalele ridicate din 1, 2, 3 etc.), distribuția rezultînd statistic conform principiului de echipartiție a energiei între toate frecvențele posibile. Pe de altă parte, postulatul lui Planck permite numai o mulțime discretă de valori ale energiei, energie egală cu o dată, de două ori, de trei ori etc. porția de energie corespunzătoare frecvenței date. Deoarece energia conținută în fiecare porție este considerată a fi proporțională cu frecvența, se obține o mulțime de valori permise pentru energie, indicate în figură prin punctele negre mari. Cu cît frecvența este mai mare, cu atît este mai mic numărul de valori permise ale energiei sub limita dată, fapt care restrînge capacitatea oscilațiilor de

înalță frecvență de a prelua o energie suplimentară mai mare. Drept rezultat, cantitatea de energie care poate fi preluată de oscilațiile de înaltă frecvență devine finită, în pofida numărului lor infinit și totul se aranjează de minune.

S-a spus că există „minciuni, minciuni sfruntate, și statistici“, dar în cazul calculelor lui Planck statistica s-a arătat a fi pe deplin apropiată de adevăr. El a obținut pentru distribuția energiei în spectrul radiației termice o formulă teoretică în perfectă concordanță cu datele de observație arătate în fig. 2. În timp ce formula lui Rayleigh-Jeans se lansează în înălțimea cerurilor, cerind o cantitate de energie totală infinită, formula lui Planck coboară la frecvențele înalte și forma sa este în concordanță perfectă cu curbele observate. Aserțiunea lui Planck, precum că conținutul în energie al unei cuante de radiație este proporțional cu frecvența, poate fi scrisă:

$$E = h\nu$$

unde ν (litera grecească niu) este frecvența, iar h este o constantă universală, cunoscută sub numele de *constanta lui Planck* sau *constanta cuantică*. Pentru ca curbele teoretice ale lui Planck să corespundă celor observate, lui h trebuie să i se atribuie o anumită valoare numerică, care s-a dovedit a fi $6,77 \times 10^{-27}$ în sistemul de unități centimetru-gram-secundă⁴.

Valoarea atât de mică a acestei constante face ca teoria cuantică să nu prezinte importanță pentru fenomenele la scară macroscopică, pe care le întâlnim în viața de toate zilele, și ca ea să apară numai în studiile proceselor care se desfășoară la scară atomică.

⁴ Dimensiunea fizică a constantei lui Planck, h , este produsul dintre energie și timp, sau (*erg* $\times$ *sec*) în unități c.g.s. și este cunoscută în mecanica clasică ca *acțiune*; acțiunea apare în multe raționamente importante, ca de exemplu în principiul lui Hamilton — principiul minimei acțiuni.

CUANTELE DE LUMINĂ ȘI EFECTUL FOTOELECTRIC

Eliberînd spiritul cuantei din cutie, Max Planck a fost el însuși speriat de moarte și a preferat să considere că porțiile de energie rezultă nu din niște proprietăți ale undelor luminoase înseși, ci din niște proprietăți interne ale atomilor care ar putea emite și absorbi radiații numai în anumite cantități discrete. Radiația este ca untul care poate fi cumpărat sau înapoiat la băcănie numai în pachete de o sută de grame, cu toate că untul ca atare poate să existe în orice cantitate dorită (deși, desigur, nu mai puțin decît o singură moleculă!) Dar numai la cinci ani de la originala propunere a lui Planck, s-a stabilit că cuanta de lumină este o entitate fizică care există independent de mecanismul emiterii sau absorbției ei de către atomi. Acest pas a fost făcut de Albert Einstein, într-un articol publicat în 1905, anul apariției primului său articol asupra teoriei relativității. Einstein a arătat că existența unor cuante de lumină rătăcind libere prin spațiu constituie o condiție necesară pentru explicarea legilor empirice ale efectului fotoelectric, adică a emisiei de electroni de către suprafețele metalice iradiate cu raze violete sau ultraviolete.

Un dispozitiv elementar pentru demonstrarea efectului fotoelectric, arătat în fig. 6a, constă dintr-un electroscop obișnuit, încărcat negativ, avînd atașată o placă metalică curată, *P*. Cînd o rază de lumină pornită de la un arc electric, *A*, care este bogat în radiații violete și ultraviolete, cade pe placă se observă că, pe măsură ce electroscopul se descarcă, lamelele *L* ale acestuia coboară. Faptul că descărcarea se datorește unor particule negative (electroni), care părăsesc placa metalică, a fost demonstrat în repetate rînduri, între alții și de fizicianul american Robert Millikan (1868—1953). Dacă între arc și placa metalică se interpune o placă de sticlă, care absoarbe radiația ultravioletă, electronii nu mai sînt emiși, ceea ce constituie o concluzie evidentă că emisia este cauzată de acțiunea razelor. Un dispozitiv mai rafinat utilizat pentru studierea detaliată a legilor efectului fotoelectric este arătat schematic în fig. 6b. El este constituit din:

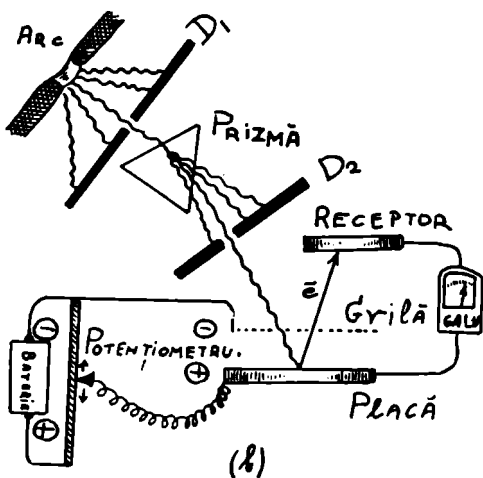
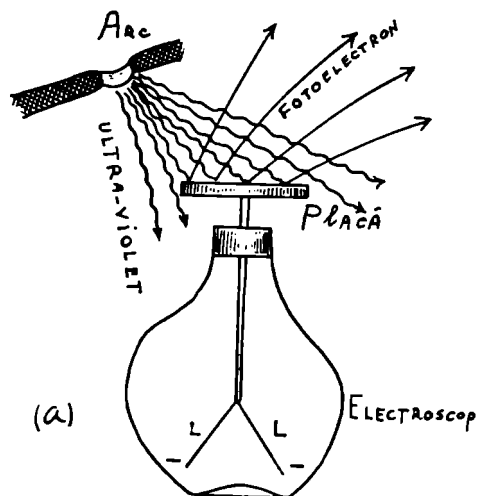
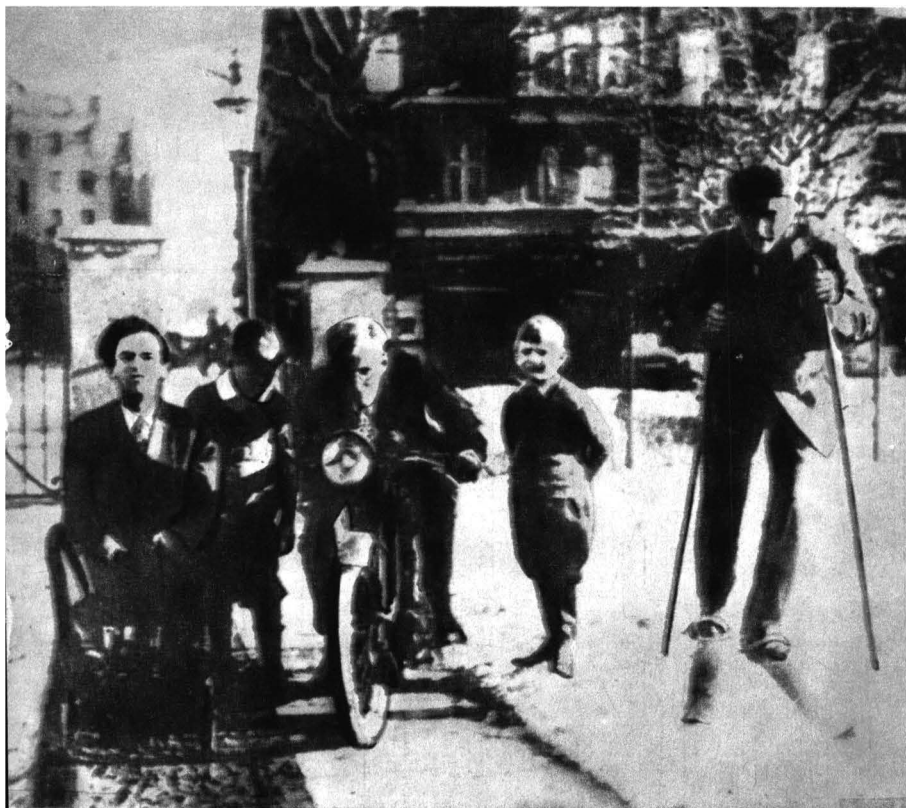


FIG. 6.
Studii experimentale ale efectului fotoelectric. În (a) este ilustrată o metodă primitivă de demonstrare a efectului fotoelectric. Radiația ultravioletă emisă de un arc electric expulzează electronii din placa de metal legată de electroscop. Foițele L încărcate negativ, care se respingeau unele pe altele, pierd sarcina și se coboară. În (b) este arătată metoda modernă. Radiația ultravioletă de la un arc electric trece printr-o prismă care permite să cadă pe placă doar o singură frecvență selectată. Rotind prisma, se poate selecta și dirija pe placă o anumită lumină monocromatică. Energia fotoelectronilor este măsurată prin capacitatea lor de a străbate drumul de la placă la receptor, mișcându-se împotriva forței electrice produsă cu ajutorul potențiometrului montat între placă și grilă.



L. Landau, A. Bohr, G. Gamow, E. Bohr, E. Teller (Fotografiați probabil de dr. H. A. Casimir) Copenhaga 1931



Sir J. J. Thomson și Lord Rutherford (fotograf necunoscut)

1. O prizmă de cuarț sau de fluorid (transparentă pentru ultraviolete) și o fantă care să permită selectarea unei radiații monocromatice, de o lungime de undă dorită.

2. Un set de discuri rotitoare cu deschideri triunghiulare, de diferite dimensiuni, care să permită modificarea intensității radiației.

3. Un recipient evacuat, într-o oarecare măsură similar cu tuburile electronice utilizate în aparatele de radio. Între placa P , care emite fotoelectroni, și grila G , se aplică un potențial electric variabil. Dacă grila este încărcată negativ, iar diferența de potențial între grilă și anodă este egală sau mai mare decât energia cinetică a fotoelectronilor exprimată în electron-volți, prin sistem nu va circula nici un curent. În caz contrar, vom avea un curent, intensitatea acestuia putînd fi măsurată cu galvanometrul GN . Folosind acest dispozitiv se poate măsura numărul și energia cinetică a electronilor expulzați de lumina incidentă, de orice energie și lungime de undă (frecvență) dată.

Studiul efectului fotoelectric în diferitele metale a condus la formularea a două legi simple:

1. În cazul unei lumini de frecvență constantă și de energie variabilă, energia fotoelectronilor rămîne constantă iar numărul lor crește direct proporțional cu intensitatea luminii (fig. 7a).

2. În cazul în care frecvența luminii se modifică, nu are loc nici un fel de emisie de fotoelectroni pînă ce frecvența nu depășește o anumită valoare ν_0 care este diferită pentru diferitele metale. Deasupra acestei frecvențe limită energia fotoelectronilor crește liniar, fiind proporțională cu diferența dintre frecvența luminii incidente și frecvența critică ν_0 a metalului (fig. 7b).

Aceste fapte bine stabilite nu puteau fi explicate pe baza teoriei clasice a luminii; ba, în unele privințe, acestea erau în contradicție cu teoria. Se știe că lumina este constituită din unde electromagnetice scurte, iar creșterea intensității luminii semnifică o creștere a forțelor electrice și magnetice care se propagă în spațiu. Deoarece electronii sînt expulzați de metal, probabil datorită acțiunii forței

electrice, energia lor ar urma să crească cu creșterea intensității luminii și nu să rămână constantă, așa cum se întâmplă. Prin urmare, în cadrul teoriei clasice electromagnetice a luminii nu există nici o justificare ca să se găsească o dependență liniară a energiei fotoelectronilor de frecvența luminii incidente.

Pornind de la ideea lui Planck asupra cuantelor de lumină și presupunând existența lor reală ca pachete de energie independente, deplasându-se prin spațiu, Einstein a reușit să dea o explicare perfectă a ambelor legi empirice ale efectului fotoelectric. El considera drept act elementar al efectului fotoelectric rezultatul ciocnirii dintre o cantă singulară de lumină incidentă și unul dintre electronii de conducție, purtători ai curentului electric în metal. În cadrul ciocnirii cuanta de lumină dispăre, cedînd întreaga sa energie electronului de conducție aflat la suprafața metalului. Dar, pentru a străbate suprafața și a ieși în spațiul liber, electronul trebuie să cheltuiască o anumită cantitate de energie pentru a se elibera din atracția ionilor metalici. Această energie, cunoscută sub numele de „lucru de ieșire“, este diferită pentru diferitele metale și este notată în mod curent cu simbolul W . Drept urmare, energia cinetică K , cu care electronul părăsește metalul, este:

$$K = h(\nu - \nu_0) = h\nu - W$$

unde ν_0 este frecvența critică a luminii sub care efectul fotoelectric nu are loc. Acest model explică simultan ambele legi deduse din experiență. Dacă se menține constantă frecvența luminii incidente, conținutul în energie al fiecărei cuante rămîne și el constant, iar mărirea intensității luminii conduce doar la o mărire corespunzătoare a numărului de cuante luminoase. În felul acesta, sînt expulzați mai mulți fotoelectroni, fiecare din ei avînd aceeași energie, ca mai înainte. Formula care dă pe K , ca funcție de ν , explică graficele empirice arătate în fig. 7 *b*, care prevăd că panta liniei va fi aceeași pentru toate metalele și că are o

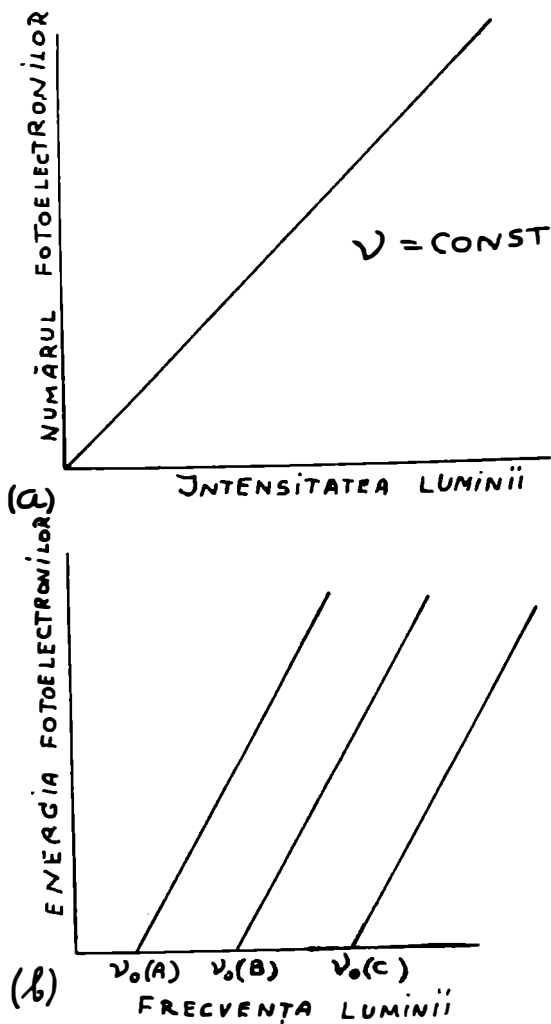


FIG. 7.

Legile efectului fotoelectric. În (a) este reprezentată variația numărului de electroni în funcție de intensitatea luminii monocromatice incidente. În (b) este reprezentată energia fotoelectronilor în funcție de frecvența luminii monocromatice incidente pentru trei metale diferite: A, B și C.

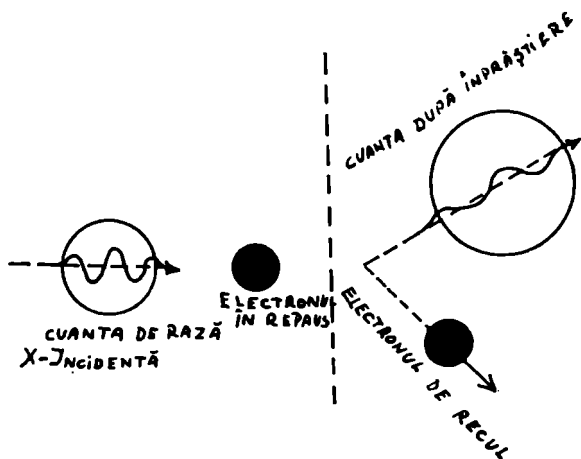


FIG. 8.

Difracția Compton a razelor X. Observați că după ciocnire lungimea de undă a cuantei razei X crește datorită cedării de energie către electron.

valoare numerică egală cu h . Această consecință a modelului lui Einstein a efectului fotoelectric este în completă concordanță cu rezultatele experiențelor și nu permite prin urmare nici o îndoială asupra realității cuantelor de lumină.

EFFECTUL COMPTON

O experiență importantă care demonstrează realitatea cuantelor de lumină a fost realizată în 1923 de un fizician american, *Arthur Compton*, care dorea să studieze ciocnirea unei cuante de lumină cu un electron aflat în mișcare liberă în spațiu. Situația ideală ar fi să se poată observa astfel de ciocniri prin intersectarea unui fascicul de lumină cu un fascicul de electroni. Din păcate însă, numărul electronilor aflați chiar în cele mai intense fascicule de electroni aflate la dispoziție este atât de mic încât ar fi de așteptat secole pentru a înregistra o singură ciocnire. Compton a depășit dificultatea, utilizând raze X ale căror cuante poartă cantități foarte mari de energie datorită frecvențelor foarte

înalte pe care le au. Energia de legătură a electronilor aflați în atomii elementelor ușoare este atât de mică în comparație cu energia purtată de fiecare cuantă de raze X , încît poate fi neglijată și aceștia (electronii) pot fi considerați ca fiind nelegați și practic liberi. Considerînd că o ciocnire liberă dintre o cuantă de lumină și un electron are loc în același mod în care are loc ciocnirea între două mingi elastice, trebuie să ne așteptăm că energia, și prin urmare frecvența razelor X care au suferit împrăștierea, va scădea o dată cu creșterea unghiului de împrăștiere. Experiențele lui Compton (fig. 8) au fost în concordanță completă cu această previziune teoretică și cu formula dedusă pe baza conservării energiei și a impulsului în ciocnirea a două sfere elastice. Această concordanță a constituit o confirmare suplimentară a existenței cuantelor de lumină.

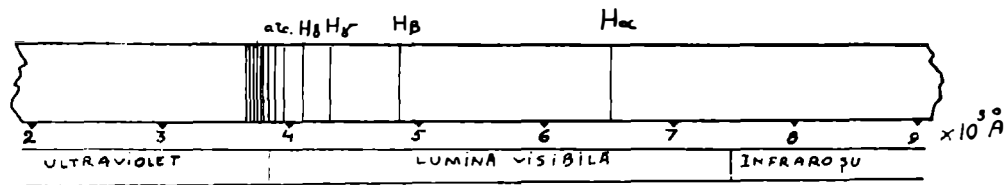


N. BOHR ȘI ORBITELE CUANTIFICATE

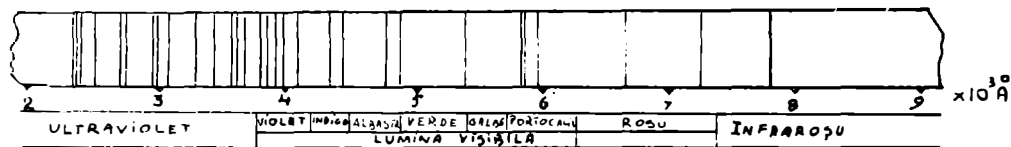
Descoperirea faptului că lumina se propagă prin spațiu și poate fi emisă sau absorbită de materie numai sub forma unor porții discrete de energie (cuante de lumină), porții al căror conținut în energie este strict definit de frecvențele lor de oscilație, a avut o influență profundă asupra concepțiilor contemporane referitoare la structura însăși a atomilor. Atunci când, în 1897, J.J. Thomson a dovedit, prin experiențe directe, că din atomi pot fi extrase particule ușoare încărcate negativ (electroni) și în urmă rămân reziduuri încărcate pozitiv (ioni), a devenit clar că atomii nu sînt așa cum presupune semnificația greacă a numelor lor, adică unități constituente indivizibile ale materiei, ci, din contra, niște sisteme complexe formate din părți încărcate pozitiv și negativ. Thomson considera atomul ca un fel de substanță încărcată pozitiv, distribuită mai mult sau mai puțin uniform în întregul volum cu electroni încărcăți negativ implantați în el, așa cum sînt stafidele într-un cozonac rotund. Electronii sînt atrași la centru de distribuția de sarcină pozitivă și se resping unii pe alții în conformitate cu legea de interacțiune electrică a lui Coulomb, iar starea normală a atomului se realizează atunci când aceste două seturi de forțe opuse se află în echilibru. Dacă atomul este

perturbat (sau, cum spun fizicienii, „excitat“) prin ciocnirea cu un alt atom sau de un electron liber aflat în trecere, electronii lui interiori (la fel ca corzile într-un pian) încep să oscileze în jurul poziției lor de echilibru și să emită lumină cu frecvențe caracteristice, fapt care explică liniile spectrale observate. Atomii diferitelor elemente chimice posedă un număr diferit de electroni interiori, distribuiți în mod diferit, și avind frecvențe caracteristice diferite, și, ca atare se deosebesc prin spectrele lor optice observate (fig. 9). Acceptîndu-se modelul atomului al lui Thomson, a fost posibil, cu ajutorul metodelor mecanicii clasice, să se calculeze distribuția de echilibru a electronilor în corpul unui atom conținînd un număr dat de electroni interni și se aștepta ca șirul frecvențelor de oscilații caracteristice calculate să coincidă cu liniile spectrale observate ale diferitelor elemente.

Thomson însuși și studenții lui au efectuat calcule complicate pentru a găsi configurațiile electronilor interatomici pentru care frecvențele de oscilații calculate să corespundă cu frecvențele observate în spectrele liniare ale diferitelor elemente chimice. Rezultatele au fost dezamăgitor de negative. Spectrele calculate teoretic pe baza modelului lui Thomson nu semănau întru nimic cu spectrele observate ale oricăruia dintre elementele chimice. Devenea din ce în ce mai evident că era necesară o modificare revoluționară a modelului clasic al atomului, a modelului lui Thomson. Acest punct de vedere era susținut în mod deosebit de un tînăr fizician danez, Niels Bohr, care după ce a primit titlul de doctor de la Universitatea din Copenhaga, pentru o lucrare asupra teoriei trecerii particulelor încărcate prin materie, a venit în 1911 în Anglia, la Laboratorul Cavendish al Universității din Cambridge, pentru a se alătura grupului care lucra sub conducerea directorului acestuia, J.J. Thomson. Bohr argumenta că, deoarece lumina nu mai poate fi tratată ca fiind unde în propagare continuă, ci, din contra, trebuie să fie dotată cu proprietățile misterioase suplimentare, de emisie și absorbție de porții discrete de energie, de mărime bine definită, rezultă că și mecanica clasică newtoniană, pe care se baza modelul atomic al lui Thomson, trebuie să fie modificată în mod corespunzător. Dacă energia electromagnetică a luminii este „cuantificată“ — adică



LINIILE SPECTRULUI DE HIDROGEN



LINIILE SPECTRULUI HELIULUI

FIG. 9.

Comparați simplitatea spectrului hidrogenului, produs de mișcarea unui singur electron, cu complexitatea și cu lipsa aparentă de ordine, cauzată de cei doi electroni în spectrul heliului. Ambele spectre se întind încă departe, în regiunile ultraviolete și infraroșii.

restrînsă la porții definite de una, două, trei sau mai multe cuante de lumină ($h\nu$, $2h\nu$, $3h\nu$, etc.) — nu este oare rezonabil să presupunem că și energia mecanică a electronilor atomici este cuantificată, adică că și aceasta poate să ia doar un șir discret de valori, valorile intermediare fiind interzise de o lege încă nedescoperită a naturii? Într-adevăr, ar fi ciudat dacă sisteme atomice construite în concordanță cu legile mecanicii clasice newtoniene, așa cum era modelul atomic al lui Thomson, ar emite și absoarbe lumină sub forma unor cuante de lumină, ca ale lui Planck, care nu se pot încadra de loc în cadrul fizicii clasice!

TEORIA LUI RUTHERFORD ASUPRA NUCLEULUI ATOMIC

J.J. Thomson nu agreea aceste idei revoluționare ale tînărului danez. O serie de discuții ascutite l-au forțat pe Bohr să se decidă să părăsească Cambridge și să-și petreacă restul său de timp ca colaborator străin într-un loc în care ideile sale, deocamdată vagi, asupra cuantificării mișcării electronilor în atomi să se lovească de o opoziție mai puțin netă. Alegerea sa a căzut asupra Universității din Manchester, unde catedra de fizică era condusă de fiul unui fermier din Noua Zeelandă, fost student al lui Thomson, anume Ernest Rutherford, care pentru descoperirile lui științifice a căpătat titlul de Sir Ernest și, mai tirziu, de Lord Rutherford of Nelson. Atunci cînd Bohr a sosit la Manchester, Rutherford era în toiul studiilor sale epocale asupra structurii interne a atomilor, pe care îi bombarda cu proiectilele de energie înaltă, cunoscute sub numele de „particule α “, emise de elementele radioactive pe atunci recent descoperite. În studii anterioare, în cea mai mare parte efectuate la Universitatea McGill, în Canada, Rutherford a fost în stare să dovedească că particulele α emise de elementele radioactive nu sînt altceva decît atomi de heliu încărcăți pozitiv, mișcîndu-se cu viteze extraordinar de mari, neîntîlnite pînă atunci în fizică. Emisia particulelor α de către atomii grei instabili ai elementelor radioactive era adesea urmată de emisia de electroni (particule β) și de radiație electromagnetică de înaltă frecvență (raze γ)

similară cu razele X obișnuite, dar avind lungimi de undă mult mai scurte. Dacă se dorește să se sfarme ceva, se alege desigur drept proiectil mai degrabă o minge solidă de fier decît una ușoară de ping-pong, și Rutherford presupunea că particulele α masive vor pătrunde cu mult mai ușor în interiorul atomului decît ușoarele particule β . Aranjamentul experienței era relativ simplu (fig. 10). O mică cantitate de material radioactiv, de exemplu *Ra*, care emitea particule α , era introdusă într-o gămălie și amplasată la o anumită distanță de o foiță subțire (*F*) făcută din metalul care urma să fie studiat. Prin trecerea razelor printr-o diafragmă (*D*), se obținea un fascicul îngust de particule α . Trecînd prin foiță, particulele α se ciocneau cu atomii ce constituiau foița și o fracțiune a particulelor suferea o împrăștiere în diferite direcții, dincolo de foiță. Căzînd pe un ecran fluorescent (*S*), amplasat în spatele foiței, fiecare particulă α producea o mică scinteie (o scintilare) în punctul de incidență. Observînd aceste scintilații cu ajutorul unui microscop (*M*), se puteau număra particulele împrăștiate sub diferite unghiuri față de direcția inițială, exact așa cum în tragerile la țintă cu arma de foc se pot măsura devierile găurilor gloanțelor de la centrul țintei. În experiențele sale, Rutherford a observat că în timp ce majoritatea particulelor treceau prin foiță, aproape fără vreo deviere, formînd un spot luminos (centrul țintei) în fața orificiului din diafragmă, unele dintre ele erau deviate sub unghiuri remarcabil de mari. Unele dispozitive experimentale oarecum diferite au arătat că în puține cazuri particulele α sînt respinse aproape înapoi la sursă.

Această observație se afla în contradicție directă cu ceea ce era de așteptat pe baza modelului atomic al lui Thomson. Trecînd prin atom, particula α incidentă poate fi deviată de la direcția sa inițială, fie datorită atracției electrice a electronilor intraatomici, fie datorită repulsiei electrice a sarcinii pozitive distribuite. Fără discuție, interacțiunea cu electronii, care sînt cam de 10.000 de ori mai ușori decît particulele α , nu putea să producă o deviere cît de cît sensibilă a mișcării particulelor α . Pe de altă parte, materialul încărcat pozitiv al modelului lui Thomson era prea rar distribuit în întregul corp al atomului pentru a fi în stare să cauzeze o deviere apreciabilă a particulelor α .

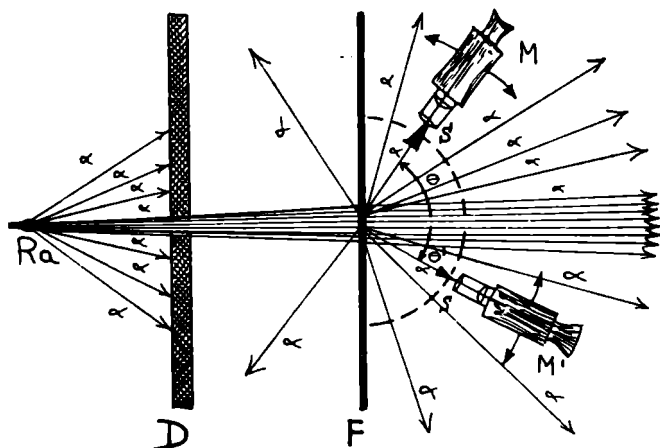


FIG. 10.

Aparatul lui Rutherford pentru studierea dependenței unghiulare a difuziei α .

ce treceau prin el. Într-adevăr, dacă aruncăm o minge de fier într-o bucată de cărbune, aceasta va ricoșa sub un unghi apreciabil, poate chiar sfărâmând cărbunele în câteva bucăți. Dar, dacă pisăm aceeași bucată de cărbune într-o pulbere fină și aruncăm aceeași minge prin norul de cărbune rezultat, mingea va trece prin acesta fără nici un fel de deviație. Devierile foarte mari observate în experiențele de împrăștiere, ale lui Rutherford, au dovedit în mod hotărît că sarcina pozitivă (asociată cu cea mai mare parte a masei) a atomului nu este distribuită în întreg corpul acestuia, ca în exemplul de mai sus al norului de praf de cărbune, ci este concentrată, ca și piesa solidă de cărbune, într-un mic simbur dur — nucleul. Dependențele observate experimental ale numărului de particule α deviate în diferitele direcții, în funcție de unghiul de difuzie, erau în concordanță perfectă cu formulele teoretice pentru difuzia unor particule care se mișcă într-un câmp de forțe centrale repulsive, a căror intensitate este invers proporțională cu pătratul distanței.

În felul acesta a luat ființă modelul atomic al lui Rutherford. Acest model, cu electronii lui negativi mișcându-se liber în spațiu în jurul unor nuclee grele, încărcate pozitiv,

aflăte în centru, semăna oarecum cu sistemul solar. Deoarece legea lui Coulomb a atracției electrice este din punct de vedere matematic identică cu legea gravitației a lui Newton (ambele forțe fiind invers proporționale cu pătratul distanței), rezultă că electronii atomici se mișcă în jurul nucleului după niște orbite circulare sau eliptice, în același mod cum se mișcă planetele în jurul Soarelui.

Există însă o mare diferență, care constă în faptul că în timp ce Soarele și planetele sînt electric neutre, nucleul atomic și electronii sînt purtătoare de sarcini electrice importante. Se cunoaște foarte bine că sarcinile electrice aflăte în oscilație dau naștere la unde electromagnetice divergente. Modelul atomic al lui Rutherford poate fi considerat ca o stație de radioemisie miniaturală, lucrînd pe frecvențe ultra-înalte. Folosînd teoria clasică a emisiei electromagnetice, se poate calcula ușor că undele de lumină emise de electronii aflați în mișcare circulară în jurul nucleului atomic vor lua cu ele în spațiu întreaga energie a electronului, în circa o sutime de milionime de secundă. Pierzîndu-și întreaga energie, electronii atomici trebuie să cadă pe nucleu și atomul încetează să mai existe!

Vorbînd riguros, astfel de pierderi de energie sînt de așteptat și în cazul planetelor sistemului solar. În conformitate cu teoria relativității generale a lui Einstein, oscilația maselor gravifice conduce de asemenea la emisia de așa-numite „unde gravifice“, care iau cu sine energie. Dar, datorită valorii mici a constantei lui Newton, pierderile de energie ale planetelor prin emisia gravifică sînt extrem de mici și de la formarea lor, acum circa patru sau cinci miliarde de ani, planetele n-au putut să piardă mai mult de cîteva procente din energia lor inițială.

CUANTIFICAREA UNUI SISTEM MECANIC

Ce este de făcut însă în cazul atomilor alcătuiți potrivit cu modelul lui Rutherford? După cum am arătat, teoretic aceștia nu pot exista mai mult de o sutime de milionime de secundă, în realitate însă ei există pentru eternitate. Această problemă i se punea și tinărului Bohr la sosirea lui la Manchester.

Factorul principal în dezvoltarea științei îl constituie tocmai înlăturarea unor astfel de contradicții între concluziile teoretice pe de o parte și faptele observate sau, uneori, chiar bunul simț pe de alta. Faptul că A.A. Michelson nu a putut detecta mișcarea Pământului printr-un eter luminifer¹, l-a condus pe Einstein la formularea teoriei relativității care a modificat noțiunile noastre bazate pe bun simț despre spațiu și timp și a provocat modificări profunde în fizica clasică. În mod asemănător, Catastrofa ultravioletă despre care am vorbit în capitolul anterior, l-a condus pe Planck la ideea absolut nouă a cuantelor de lumină.

Imposibilitatea teoretică a modelului lui Rutherford, verificat experimental, era în concordanță cu sentimentul ascuns al lui Bohr că, dacă energia electromagnetică este cuantificată, este necesar să fie cuantificată și energia mecanică, deși poate într-un mod oarecum diferit. Într-adevăr, atunci când un atom excitat emite o cantă de lumină cu energie $h\nu$, energia sa mecanică trebuie să scadă exact cu aceeași cantitate. Deoarece spectrele atomice sînt formate dintr-o serie discretă de linii net definite, diferențele de energie dintre stările diferite posibile ale unui atom trebuie să posede de asemenea valori net definite și în același mod trebuie să fie și energiile absolute ale acestor stări înseși. Aceasta conduce la ideea că mecanismul atomic este oarecum similar cu cutia de viteze a unui automobil. Ea poate fi făcută să meargă în viteza 1, a 2-a, a 3-a etc. dar niciodată în viteza $1\frac{1}{2}$ sau $3\frac{3}{5}$...

Fie E_1, E_2, E_3, E_4 etc. energiile posibile ale diferitelor stări ale unui atom, aranjate în ordine crescătoare (fig. 11). Un atom posedă totdeauna o oarecare energie internă, dar atunci când energia sa a coborît la nivelul minim posibil, E_1 , nu mai există nici o energie disponibilă pentru emisia unei cuante de lumină. Acest nivel E_1 este *starea fundamentală* sau *normală* a atomului în care acesta poate rămîne la infinit. Ea este cunoscută sub numele de „energia de zero” și, în cazul unui oscilator, este de $1/2h\nu$. Să presupunem acumă că atomul este adus într-o stare oarecare excitată, cu o

¹ Vezi Bernard Jaffe, *Michelson și viteza luminii*, Editura Științifică, București, 1967.

energie mai înaltă, E_n . Această energie poate fi atinsă, de exemplu, supunind gazul la o temperatură foarte înaltă, ca de exemplu în atmosfera Soarelui, unde atomii sînt aduși în stări excitate datorită ciocnirilor termice violente dintre ei. O altă cale de excitare a atomilor este trecerea unei descărcări electrice de înaltă tensiune printr-un tub de sticlă umplut cu un gaz rarefiat². Atomii sînt excitați prin șocul electronilor rapizi ce zboară prin tub de la electrodul negativ (catod) la cel pozitiv (anod). Astfel de dispozitive în care gazul devine luminos, ca urmare a descărcării electrice de înaltă tensiune, au fost cunoscute inițial sub numele de tuburi Geissler, după numele inventatorului lor, Heinrich Geissler. Le vedeți astăzi peste tot în reclamele luminoase de pe stradă și în alte dispozitive de iluminare.

Atunci cînd atomul este excitat la starea de energie m , E_m , el poate să revină la o stare oarecare cu energie mai joasă, E_n ($n < m$), eliberînd diferența de energie sub forma unei cuante de lumină. Astfel, putem scrie:

$$h\nu_{m, n} = E_m - E_n$$

sau

$$\nu_{m, n} = \frac{E_m - E_n}{h}$$

Cei doi indici ai lui $\nu_{m, n}$ arată că această frecvență particulară din spectru corespunde la tranziția de la starea cuantică de mișcare m , la starea cuantică n .

Modelul emisiei unei cuante de lumină ca rezultat al tranziției atomului de la o stare energetică mai înaltă la una mai joasă are o consecință foarte interesantă. Să presupunem că în spectrul unui element oarecare observăm două linii care corespund tranziției de la starea cuantică 6, la a 4-a și de la a 4-a, la a 3-a (partea stîngă din fig. 11). Atunci

² Este necesar să se utilizeze un gaz rarefiat pentru a permite electronilor să-și recîștige energia pierdută în fiecare ciocnire, dîndu-le un interval suficient de timp între două ciocniri succesive pentru a fi accelerați în cîmpul electric aplicat. La presiunea normală atmosferică gazele nu conduc electricitatea și dacă tensiunea devine foarte înaltă are loc o străpungere bruscă sub forma unui arc.

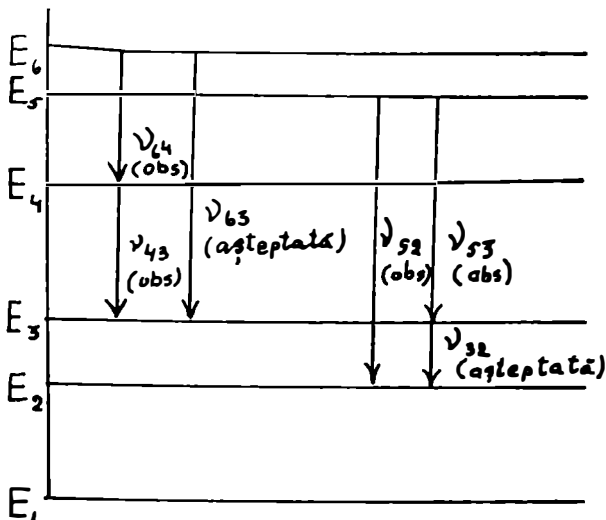


FIG. 11.

Explicarea lui Bohr a regulei lui Rydberg.

este posibil ca tranziția să aibă loc de-a dreptul de la starea a 6-a, la a 3-a și vom găsi o linie cu frecvența

$$\nu_{6,3} = \nu_{6,4} + \nu_{4,3}$$

Situația arătată în partea dreaptă a aceleiași figuri este cea opusă. Din faptul că observăm frecvențele $\nu_{5,2}$ și $\nu_{5,3}$ rezultă că putem de asemenea observa și frecvența

$$\nu_{3,2} = \nu_{5,3} - \nu_{5,2}$$

Spectroscopistul elvețian W. Ritz a descoperit această lege a *Adunării și Scăderii*, pe cînd Niels Bohr era încă un băiat de școală. Însă în spectroscopia precuantică, regula lui Ritz ca și alte regularități similare numerice dintre frecvențele observate constituiau doar niște șarade enigmatice care nu puteau fi explicate în mod satisfăcător. Ele au fost însă foarte folositoare lui Niels Bohr în încercarea sa de a rezolva problema emisie și absorbției de lumină de către atomi, prin introducerea ideii de stări cuantice discrete ale electronilor atomici.

Bohr a ales pentru primele sale studii atomul de hidrogen, cel mai ușor, și atomul presupus a fi construit cel mai simplu, care era de asemenea cunoscut ca posedind un spectru foarte simplu. În anul 1885, un învățător elvețian, J.J. Balmer, care era foarte interesat de regularitățile liniilor spectrale atomice, a descoperit că frecvența părții vizibile a spectrului hidrogenului poate fi reprezentată cu mare precizie de o formulă foarte simplă. Frecvențele acestor linii, arătate în partea de sus a fig. 9 (unde ele sînt reprezentate în lungimi de undă $\lambda = c/\nu$), sînt date în tabelul următor³:

$$H\alpha \longrightarrow \nu_1 = 4,569 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

$$H\beta \longrightarrow \nu_2 = 6,168 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

$$H\gamma \longrightarrow \nu_3 = 6,908 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

$$H\delta \longrightarrow \nu_4 = 7,310 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

După cum cititorul poate verifica el însuși, aceste valori pot fi obținute din formula

$$\nu_{m, n} = 3,289 \times 10^{15} \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{m^2} \right) \text{ s}^{-1}$$

în care m ia valorile⁴: 3, 4, 5, 6. Pentru n mai mari, frecvențele intră în regiunea ultravioletă și liniile devin din ce în ce mai îndesate, convergînd spre valoarea

$$3,289 \times 10^{15} \times \frac{1}{4} = 6,225 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

În modelul lui Bohr asupra relațiilor dintre cuanta de lumină emisă $h\nu_{m,n}$ și stările energetice (sau nivelele) E_m și E_n ale atomului, formula lui Balmer spune că linia m a seriei se datorează tranziției de la starea m , a unui atom de

³ s^{-1} semnifică „pe secundă”; cm^{-1} semnifică „pe centimetru”; m^{-1} semnifică „mere pe lei”.

⁴ Coeficientul numeric din formulă este adesea notat cu litera R și cunoscut ca constanta lui Rydberg deși ar trebui să fie numită mai corect constanta lui Balmer.

hidrogen excitat, la starea a 2-a (deoarece $4 = 2^2$). Dacă în locul lui

$$\frac{1}{4} = \frac{1}{2^2}$$

se înlocuiește în formula lui Balmer

$$1 = \frac{1}{1^2}$$

și se pune $m = 2, 3, 4$, etc., se obține o secvență de linii care se duc departe în regiunea ultravioletă, care au fost găsite realmente de Theodore Lyman. Pe de altă parte, dacă se schimbă primul termen al formulei lui Balmer cu

$$\frac{1}{9} = \frac{1}{3^2} \text{ sau } \frac{1}{16} = \frac{1}{4^2},$$

se obțin frecvențele de lumină care cad departe în regiunea infraroșie și care au fost găsite de Friedrich Paschen și respectiv de Frederick Brackett. Rezultă că stările cuantice mecanice trebuie să arate așa cum sînt figurate în fig. 12, care indică de asemenea tranzițiile care rezultă în emisia seriilor Lyman, Balmer, Paschen și Brackett.

În felul acesta, fiecare linie a spectrului este caracterizată prin doi indici, m și n , corespunzători celor două nivele cuantice între care are loc tranziția (pornind de la m și terminînd la n). Deoarece energia cuantei de lumină este egală cu diferența de energie dintre cele două stări, de la care se pleacă și la care se ajunge, formula generalizată a lui Balmer trebuie rescrisă astfel:

$$h\nu_{m,n} = Rh \left[\left(-\frac{1}{m^2} \right) - \left(-\frac{1}{n^2} \right) \right]$$

sau

$$h\nu_{m,n} = \left(-\frac{Rh}{m^2} \right) - \left(-\frac{Rh}{n^2} \right)$$

în care cantitățile din cele două paranteze reprezintă nivelele de energie E_m și E_n . Explicarea faptului că aceste energii sînt scrise ca mărimi negative constă în faptul că în mod convențional energie zero se atribuie acelei stări a sistemului

în care toate părțile acestuia sînt la distanțe infinite unele de altele. În felul acesta, dacă energia sistemului este pozitivă, el nu mai constituie un întreg și toate componentele sale se îndepărtează unele de altele. Într-un sistem stabil, ca cel al planetelor, care se rotesc în jurul Soarelui sau ca acela al electronilor, care se rotesc în jurul nucleului atomic, energia este negativă și pentru a separa părțile este necesară o cantitate suplimentară de energie, din afară.

Pentru a explica valorile care rezultă potrivit formulei de mai sus pentru energiile diferitelor stări ale atomului de hidrogen, Bohr a făcut două presupuneri simplificatoare:

Prima: Atomul de hidrogen fiind cel mai simplu atom din întregul sistem periodic al elementelor, conține *doar un* electron.

A doua: Diferitele stări cuantice ale atomului de hidrogen corespund la mișcarea acestui electron pe *orbite circulare* cu raze diferite. Acceptînd aceste presupuneri, căpătăm posibilitatea determinării orbitelor cuantice ale electronilor din relația:

$$E_n = -\frac{Rh}{n^2}$$

Să considerăm mișcarea pe orbită a unui electron în starea de excitație a n -a, a unui atom de hidrogen, și să notăm cu r_n raza și cu v_n viteza orbitală a electronului în starea a n -a. Masa electronului este m_e , sarcina sa $-e$, iar sarcina nucleului (în cazul acesta un proton) este $+e$. Condiția ca electronii să se miște pe o orbită circulară este ca forța de atracție electrostatică $-\frac{e^2}{r^2}$ să fie echilibrată de forța centrifugă $+\frac{mv^2}{r}$.

Din

$$-\frac{e^2}{r^2} + \frac{m_e v^2}{r} = 0$$

rezultă

$$v = \frac{e}{\sqrt{m_e r}}$$

care dă viteza v a electronului necesară pentru mișcarea sa pe un cerc de rază r . Conform cu această ecuație din mecanica

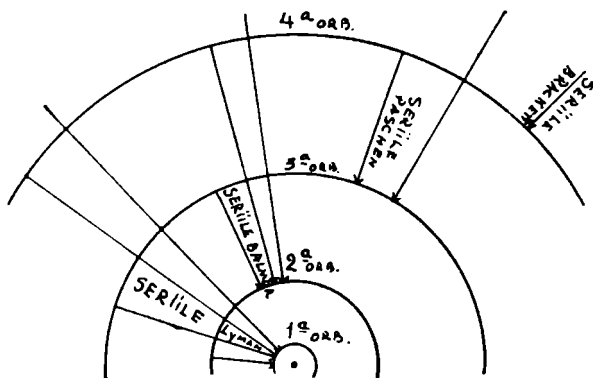


FIG. 12.

Modelul inițial al lui Bohr pentru atomul de hidrogen. Seriile Lyman sînt amplasate în regiunea ultravioletă, iar seriile Balmer în partea vizibilă a spectrului. Seriile Paschen și Brackett în zona infraroșie.

clasică, electronul se poate mișca pe *orice* orbită circulară, cu condiția ca el să posede viteza necesară.

Care este condiția cuantică, care selectează numai orbitele cu energiile $E_n = -Rh/n^2$?

În teoria cuantică a radiației, expusă în paragraful precedent, s-a stabilit că o oscilație cu o frecvență oarecare ν poate purta numai energia uneia, a două, a trei, sau a mai multe cuante de lumină, în așa fel încît $E_n = nh\nu$ ($n = 1, 2, 3$ etc).

Putem rescrie formula, în forma:

$$\frac{E_n}{\nu} = -nh$$

care semnifică faptul că cantitatea E/ν poate fi doar un multiplu întreg al constantei cuantice h . Putem menționa aici că dimensiunea fizică a lui h este:

$$\begin{aligned} |\text{acțiunea}| &= \frac{|\text{energie}|}{|\text{frecvență}|} = \frac{|\text{masă}| \cdot |\text{viteză}|^2}{|\text{frecvență}|} = \\ &= \frac{|\text{masă}| \cdot |\text{lungime}|^2}{|\text{timp}|^{-1} \cdot |\text{timp}|^2} = |\text{masă}| \cdot \frac{|\text{lungime}|}{|\text{timp}|} \cdot |\text{lungime}| = \\ &= |\text{masă}| \cdot |\text{viteză}| \cdot |\text{lungime}|. \end{aligned}$$

Produsul dintre *masa* unei particule, *viteza* acesteia și *distanța* pe care o parcurge este o cantitate bine cunoscută, numită *acțiune*, și joacă un rol important în mecanica analitică clasică. De exemplu, „principiul minimei acțiuni“, formulat de matematicianul francez P.L.M. de Maupertuis, în 1747, afirmă că o particulă supusă unor forțe mecanice se va deplasa din punctul *A* în punctul *B* pe acea traiectorie, dintre toate traiectoriile posibile între aceste două puncte, pentru care „acțiunea totală“ de la *A* la *B* va fi fie cea mai mică, fie cea mai mare. Legea lui Planck a cuantelor de lumină adaugă o condiție suplimentară la principiul lui Maupertuis: *acțiunea totală trebuie să fie totdeauna un multiplu întreg de h .*

În cazul unei traiectorii circulare închise a electronului în jurul nucleului condiția cuantică va cere ca produsul dintre masa electronului, viteza acestuia și distanța parcursă într-o rotire să fie un multiplu întreg de h . Astfel, pentru a n -a orbită a lui Bohr, rezultă:

$$m_e \cdot v_n \cdot 2\pi r_n = nh$$

$$m_e \cdot \sqrt{\frac{e}{m_e r_n}} \cdot 2\pi r_n = 2\pi e \sqrt{m_e} \cdot \sqrt{r_n} = nh$$

sau

$$r_n = \frac{h^2}{4\pi^2 e^2 m} \cdot n^2$$

Vom calcula acum energia totală E_n , a unui electron de pe orbita a n -a, care este suma energiei cinetice K și a celei potențiale U . Folosind expresia pentru viteză $v = e/\sqrt{m_e r}$ dată mai înainte și ținând seama că energia potențială a două sarcini electrice $+e$ și $-e$ distanțate la r este $+e^2/r$, scriem:

$$\begin{aligned} E_n &= K_n + U_n = \frac{1}{2} m_e \cdot \frac{e^2}{m_e r_n} + \frac{e^2}{r_n} = \\ &= \frac{1}{2} \frac{e^2}{r_n} - \frac{e^2}{r_n} = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{r_n}. \end{aligned}$$

Înlocuind în această expresie pe r_n cu expresia din formula de mai sus, obținem:

$$E_n = - \frac{4\pi^2 e^4 m_e}{h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

care coincide cu expresia empirică

$$E_n = - \frac{Rh}{n^2}$$

obținută din formula lui Balmer, dacă punem:

$$R = \frac{4\pi^2 e^4 m_e}{h^3}.$$

Atunci cînd Bohr a înlocuit în această expresie valorile numerice pentru e , m_e și h , el a obținut $R = 3,289 \times 10^{15} s^{-1}$, care este exact valoarea empirică obținută pentru R din observațiile spectroscopice. În felul acesta, problema cuantificării unui sistem mecanic a fost rezolvată cu succes.

ORBITELE ELIPTICE ALE LUI SOMMERFELD

Lucrarea inițială a lui Bohr asupra atomului de hidrogen a fost curînd urmată de alta, a unui fizician german, Arnold Sommerfeld, care a extins ideile lui Bohr pentru cazul orbitelor eliptice. Așa cum se arată în fig. 13, mișcarea unei particule în cîmpul unei forțe centrale este în general caracterizată prin două coordonate (polare), distanța r a particulei la centrul de atracție și unghiul poziției Φ (azimutal) față de axa mare a elipsei; r are valoarea maximă cînd $\Phi = 0$, scade la valoarea minimă pentru $\Phi = \pi$ și crește din nou la valoarea sa maximă, pentru $\Phi = 2\pi$. Astfel, spre deosebire de orbitele circulare ale lui Bohr, unde r rămîne constant și se modifică doar Φ , mișcarea pe orbitele eliptice ale lui Sommerfeld este caracterizată prin două coordonate independente r și Φ . De aici rezultă că fiecare orbită eliptică cuantificată trebuie să fie caracterizată prin două numere cuantice: numărul cuantic azimutal n_Φ și cel cuantic radial n_r . Aplicînd condițiile de cuantificare ale lui Bohr, potrivit cărora acțiunile totale mecanice pentru componentele mișcării *azimu-*

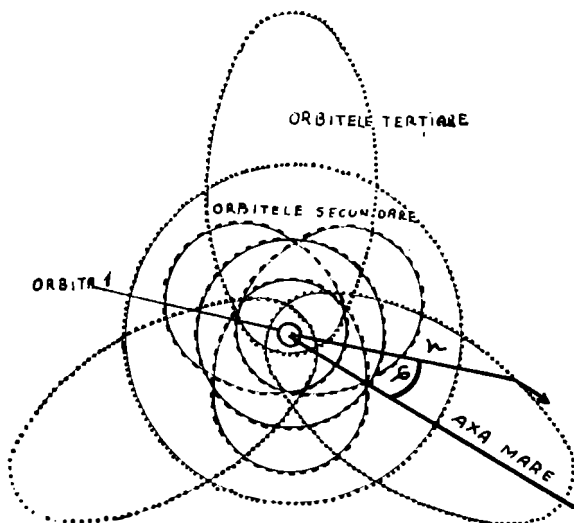


FIG. 13.

Orbite cuantificate circulare și eliptice în atomul de hidrogen. Prima orbită circulară (linia plină) corespunde energiei celei mai scăzute a electronului. Următoarele patru orbite, una circulară și trei eliptice (linii întrerupte), corespund la aceeași energie, care e mai înaltă decât aceea a primei orbite. Următoarele nouă orbite (linii punctate), dintre care sînt arătate în figură doar patru, corespund la o energie și mai înaltă (aceeași, pentru toate cele nouă orbite).

ale și radiale n_ϕ și n_r trebuie să fie multipli întregi de h , Sommerfeld a obținut pentru energia mișcării eliptice cuantificate formula:

$$E_{n_\phi, n_r} = - \frac{Rh}{(n_\phi + n_r)^2}$$

Este exact aceeași formulă ca și formula inițială a lui Bohr, cu singura deosebire că numitorul, în loc să fie pătratul unui număr întreg, este pătratul sumei a două numere întregi arbitrare, care desigur este el însuși un număr întreg arbitrar. Punind $n_r = 0$, obținem ca un caz particular orbitele circulare ale lui Bohr. Dacă $n_r \neq 0$, obținem orbite eliptice cu diferite grade de elipticitate. Cu toate formele lor diferite

însă, energiile tuturor orbitelor care corespund la aceeași sumă $n_{\phi} + n_r$, sînt exact aceleași. Suma $n_{\phi} + n_r$, notată de regulă simplu cu n , este cunoscută ca *numărul cuantic principal*.

E cazul să precizăm aici că tratarea relativistă a atomului de hidrogen dă rezultate ușor diferite, din cauză că masa unei particule potrivit mecanicii lui Einstein crește cu viteza acesteia, tinzînd spre o valoare infinită cînd viteza se apropie de viteza luminii, c . Într-adevăr, dacă m_0 este „masa de repaus” a unei particule (practic, masa acesteia cînd se mișcă cu mult mai lent decît lumina), masa la o viteză mult mai mare v este dată de

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

și tinde spre infinit, cînd v se apropie de c . Deoarece în mișcarea eliptică viteza se modifică în diferitele puncte ale traiectoriei (legea a doua a lui Kepler), masa electronului variază și dînsa, și calculele devin ceva mai complicate. În cazul acesta, energiile diferitelor orbite corespunzătoare aceluiași număr cuantic principal devin ușor diferite și fiecare nivel singular se scindează în cîteva componente amplasate foarte apropiat unele de altele. Corespunzător, fiecare linie spectrală singulară, care rezultă din tranzițiile dintre două stări cuantice caracterizate prin două numere cuantice principale m și n se scindează într-un număr de componente. Această multiplicare, care poate fi observată numai utilizînd un analizor spectral cu o putere de rezoluție foarte mare, este cunoscută ca „structura fină” a liniilor spectrale. Diferențele de frecvență între componentele de structură fină depind de așa-numita „constantă a structurii fine” α dată de

$$\alpha = \frac{e^2}{hc} = \frac{1}{137}$$

Această cantitate este o mărime fără dimensiuni, fiind un număr pur, și valoarea ei mică explică apropierea componentelor de structură fină. Dacă c ar fi infinită, α ar fi zero și nu s-ar observa nici un fel de structură fină.

O altă rafinare a teoriei inițiale a lui Bohr vine de la luarea în considerare a faptului că orbitele eliptice ale lui Sommerfeld nu sînt obligatoriu amplasate în același plan, ci pot avea diferite orientări în spațiu, făcînd ca atomii cu mulți electroni care se mișcă de-a lungul a multor orbite diferite să nu apară ca niște discuri plate (ca în cazul sistemului solar), ci mai degrabă ca niște corpuri tridimensionale.

INSTITUTUL LUI BOHR

La întoarcerea triumfală a lui Bohr în Danemarca, Academia Regală Daneză de Științe i-a acordat sprijin financiar pentru a-și construi un institut propriu de cercetări atomice și pentru a asigura burse pentru tinerii fizicieni teoreticieni din întreaga lume care ar dori să vină la Copenhaga să lucreze cu dînsul. În felul acesta a apărut la adresa Blegdamsvej⁵ 15, o clădire a Institutului de Fizică Teoretică al Universității, iar ușă în ușă cu acesta, casa directorului, pentru Bohr și familia sa. Nu este ne la locul lui să menționăm aici că Academia Regală Daneză de Științe are principalele sale surse financiare la fabricile de bere Carlsberg, care produc cea mai bună bere din lume. Cu mulți ani înainte, întemeietorul fabricii de bere a donat veniturile acesteia Academiei, pentru a fi utilizate în dezvoltarea științei, cu mențiunea în actul de donație ca palatul pe care bătrînul Carlsberg și-l construise pentru sine, în mijlocul proprietății sale, să fie utilizat ca reședință pentru cei mai cunoscuți oameni de știință danezi în viață. La începutul deceniului al 3-lea, Bohr s-a mutat cu familia sa în palat, cînd el devenise celebru, iar cel care ocupa palatul Carlsberg murise. În fig. 14 este redată o schiță a unei cravate care a fost făcută la aniversarea binecunoscutului biochimist danez Linderstrøm Lang, care timp de mulți ani a fost directorul laboratorului de cercetări al fabricii de bere Carlsberg și care arată o sticlă de bere Carlsberg. Ea constituie un simbol pentru toți aceia care au lucrat cu bursă Carlsberg în Institutul lui Bohr.

⁵ Astăzi, adresa oficială a Institutului a fost schimbată, la Blegdamsvej 17.



FIG. 14.
Berea Carlsberg și consecințele sale.

Institutul Bohr a devenit repede centrul mondial al fizicii cuantice și, pentru a parafraza pe vechii romani, „toate drumurile duceau la Blegdamsvej 17“. Institutul era plin de tineri fizicieni teoreticieni și, în general, de idei noi cu privire la atomi, la nucleele atomilor și la teoria cuantică. Popularitatea institutului se datora atât geniului directorului său, cât și inimii acestuia calde, se poate spune chiar părintești. În timp ce alt geniu al acestei epoci, Albert Einstein,

de asemenea un om foarte cald, nu a format niciodată ceea ce se cheamă „o școală” și a lucrat, de regulă, cu un singur asistent, pentru a avea cu cine discuta, Bohr a crescut mulți „copii” științifici. Aproape fiecare țară în lume are fizicieni care spun cu mândrie: „Am lucrat cu Bohr”. Vizitînd odată Universitatea din Göttingen, Bohr a întîlnit un tînr fizician german, Werner Heisenberg, (vezi capitolul V), care, la vîrsta de 25 de ani, a realizat importanți pași înainte în domeniul mecanicii cuantice. Bohr i-a propus lui Heisenberg să vină la Copenhaga, să lucreze împreună. În ziua următoare, la un dîneu dat în onoarea lui Bohr la Universitate, doi polițiști germani în uniformă au întrerupt masa și unul din ei, punînd mina pe umărul lui Bohr, a anunțat: „Sînteți arestat sub învinuirea de răpire de copii mici!” Desigur, „polițiștii” erau doi studenți costumați, și Bohr nu a fost niciodată dus la închisoare; dar Heisenberg a mers la Copenhaga! Mulți fizicieni teoreticieni din Europa și America s-au dus la Copenhaga pentru un an, pentru doi ani sau mai mulți și pe urmă reveneau mereu, mereu în anii următori: P.A.M. Dirac (vezi capitolul VI) și N.F. Mott (actualmente directorul Laboratorului Cavendish) din Anglia; H.A. Kramers și H. Casimir din Olanda; Wolfgang Pauli (capitolul III), Werner Heisenberg (capitolul V) și M. Delbruck (vezi Apendicele), și Carl von Weizsäcker din Germania; L. Rosenfeld din Belgia; S. Rosseland din Norvegia; O. Klein din Suedia; G. Gamow și L. Landau din Rusia; R.C. Tolman, J.C. Slater și J. Robert Oppenheimer din Statele Unite; Y. Nishina din Japonia; etc. Ei mergeau pentru un sejur mai lung, pentru o scurtă vizită sau exact pentru conferințele care aveau loc în fiecare primăvară.

Unul din cei mai pitorești vizitatori a fost Paul Ehrenfest, profesor la Universitatea din Leyden. Ehrenfest s-a născut la Viena, în 1880, a studiat sub conducerea lui Boltzmann, cîpătînd titlul de doctor în științe în 1904. În acel an el s-a căsătorit cu o matematiciană rusă, Tatiana, și s-a mutat la Petersburg (azi Leningrad) unde a rămas pînă în 1912, cînd a fost invitat la catedra de fizică a Universității din Leyden. Aici el a rămas pînă la moartea sa, în 1933. Lucrările sale de mecanică statistică și de teorie a invariantilor adiabatici sînt prea abstracte și complicate pentru a fi descrise în această lucrare, dar el a fost un membru neprețuit al tuturor întîl-

nirilor științifice datorită cunoștințelor lui largi și adânci de fizică, precum și structurii critice a inteligenței sale care-l ajutau să găsească golurile (uneori pe cele rele) în noile teorii propuse. El obișnuia să-și spună singur „dascăl” și mulți dintre studenții săi au obținut rezultate foarte bune în activitatea lor științifică.

Odată⁶, pe cînd călătoream din Danemarca în Anglia, prin Olanda, Ehrenfest m-a invitat să rămîn la dînsul pentru citeva zile. El m-a așteptat la gară, m-a condus acasă și după ce mi-a arătat camera de musafiri în care urma să dorm, mi-a spus: „Să nu fumezi aici. Dacă dorești să fumezi, te duci în stradă”. Pe vremea aceea fumam cel puțin tot așa de mult ca și astăzi, și am evitat regula impusă de dînsul, suflînd fumul de țigară în ușile de tiraj ale marelui sobe olandeze din camera mea. El detesta orice fel de miros, cu excepția aceluia de aer proaspăt. Într-o zi, studentul său Casimir (actualmente directorul științific al Companiei de radio Philips) avea o întîlnire cu dînsul, într-o după masă. Înainte de întîlnire, Cas (o prescurtare de la Casimir care în olandeză înseamnă „brînză”) s-a dus la un frizer să se tundă și a observat prea tîrziu că frizerul îi freca părul blond cu o loțiune. El a trebuit să-și petreacă cele două ore înainte de întîlnirea cu Ehrenfest parcurgînd străzile pentru ca mirosul loțiunii să dispară. Și, desigur, nimeni n-ar fi îndrăznit să-i spună lui Ehrenfest că băutura olandeză este mai bună (sau mai rea) ca ginul englezesc!

Într-o piesă de teatru de amatori, celebră printre oamenii de știință, Faust-ul de la Blegdamsvej (reprodus în traducere în Apendicele acestei cărți), Ehrenfest juca rolul lui Faust pe care Mefisto (Pauli) îl seduce, arătîndu-i o imagine a lui Gretchen (Neutrino).

Personalitatea lui Niels Bohr și bucuria de a trăi și a lucra în institutul său sînt încă vii în amintirile mele din anul 1928 și pînă la moartea acestuia, și sper că una sau două anecdote vor reda ceva din farmecul acestui om deosebit de remarcabil.

După ce am trecut cu succes cuprinzătorul examen de la Universitatea din Leningrad, în primăvara anului 1928

⁶ Povestindu-și propriile amintiri, autorul se va îndepărta de la convenția academică de modestie și va scrie la persoana întîia.

am întreprins diligențele necesare pentru a căpăta permisiunea guvernului sovietic de a petrece două luni la Școala de vară a Universității din Göttingen...

Prezentînd recomandări de la cîțiva profesori ai universității, am izbutit să obțin o sumă destul de mică de mărci germane și m-am imbarcat pe un vapor care călătorea de la Leningrad în Germania. Sosit la Göttingen, am închiriat o cameră tipică de student și m-am pus pe lucru.

Aceasta se întîmpla exact la doi ani după descoperirea mecanicii ondulatorii (vezi capitolul IV) și fiecare era preocupat să extindă teoriile inițiale ale lui Bohr asupra structurii atomice și moleculare în domeniul nou și mai înaintat al mecanicii ondulatorii. Mie nu-mi place însă, și niciodată nu mi-a plăcut, să lucrez în domenii aglomerate, în care lumea se înghesuie, și m-am decis să văd dacă se poate face ceva în domeniul structurii nucleului atomic. Pe vremea aceea, nucleul se studia experimental, dar nu se încercase încă nici o teorie asupra structurii și proprietăților sale. În aceste două luni de la Göttingen am dat peste o mină de aur și am fost în stare să explic, pe baza mecanicii ondulatorii, fisiunea spontană a nucleelor radioactive ca și dezintegrarea nucleului bombardat cu particule din afară. După cum am aflat mai tîrziu, o lucrare foarte asemănătoare fusese făcută simultan de fizicianul englez R.W. Gurney, în colaborare cu fizicianul american E.U. Condon; într-adevăr, articolele noastre asupra acestei lucrări au fost prezentate spre publicare aproape în aceeași zi.

La închiderea Școlii de vară de la Göttingen, banii mi se terminaseră și urma să plec acasă. Pe drum însă, am hotărît să mă opresc la Copenhaga, pentru a-l întîlni pe profesorul N. Bohr, a cărui operă o admiram atît. La Copenhaga am luat cea mai ieftină cameră într-un mic hotel sărăcăcios și m-am dus la Institutul lui Bohr, pentru a-i solicita secretarei Frøken Schultz (domnișoară) o întrevvedere cu Bohr. (Cînd am vizitat Copenhaga, cu cîțiva ani în urmă, cu un an înaintea morții lui Bohr, secretara continua să lucreze.) „Professorul poate să vă primească astăzi după amiază“, mi-a spus ea. Cînd am intrat în cabinetul lui de studiu, am fost întîmpinat de un om prietenos, zîmbitor, de vîrstă mijlocie, care m-a întrebat care sînt interesele mele în fizică și la ce lucrez în momentul respectiv. I-am povestit despre lucrarea făcută

la Göttingen asupra transformărilor nucleare, al cărei manuscris a fost trimis spre publicare, dar nu apăruse încă. Bohr a răsfoit lucrarea foarte atent și a spus: „Foarte interesant, într-adevăr foarte, foarte interesant. Cît timp ai să mai rămîi aici?” I-am explicat că mi-au mai rămas bani exact pentru o singură zi. „Ai putea să rămii însă un an, m-a întrebat Bohr, dacă aș obține pentru dumneata o bursă Carlsberg de la Academia noastră de Științe?”⁷. Mi s-a tăiat respirația și, în fine, am reușit să bolborosesc: „Da, desigur!” Pe urmă, lucrurile s-au desfășurat repede. Frøken Schultz mi-a găsit o cameră foarte drăguță, într-o pensiune condusă de Frøken Have, la cîteva clădiri depărtare de Institut, care a devenit ulterior „o tabără” pentru mulți tineri fizicieni veniți să lucreze cu Bohr. Lucrul la Institut era foarte ușor și simplu: fiecare putea să facă ce dorea, să vină la lucru și să plece acasă cînd dorea. Un alt tînăr bursier, care a venit să locuiască la pensiunea lui Frøken Have, a fost Max Delbruck, din Germania. Amindurora ne plăcea să dormim tîrziu dimineața și Frøken Have a elaborat o metodă specială pentru a ne trezi. Ea obișnuia să vină la camera mea și să mă trezească: „Doctor Gamow, ar fi mai bine să vă sculați. Doctorul Delbruck tocmai și-a terminat micul dejun și a plecat la lucru!” Pe urmă, dînsa proceda în același fel cu Delbruck, care mai dormea: „Doctor Delbruck, sculați-vă, doctorul Gamow tocmai a plecat la lucru!” Și pe urmă, Max și cu mine ne ciocneam la baie. Fiecare înainta însă cîte ceva în lucrul lui, mai ales către seară, care este timpul cel mai inspirat pentru fizicienii teoreticieni. Seara, lucrul în biblioteca Institutului era adesea întrerupt de către Bohr, care obișnuia să spună că e foarte obosit și ar dori să meargă la cinema. Singurele filme care îi plăceau erau western-ele sălbatice (în stil Hollywood) și el avea nevoie totdeauna de o pereche de studenți ca să meargă cu el și să-i explice complicatele comploturi care implicau indieni prieteni și dușmani, bravi cowboy și aventurieri, șerifi, bufetiere, căutători de aur și alte tipuri din Old West. Dar mintea sa teoretică se vedea pînă și în aceste expediții la cinema. El a dezvoltat o teorie care explica de ce totdeauna cel rău este cel care trage primul, iar eroul pozitiv este mai rapid și izbutește să-l ucidă. Acea-

⁷ Al cărei membru am onoarea să fiu acum.

stă teorie a lui Bohr se baza pe psihologie. Deoarece eroul nu trage niciodată primul, cel rău trebuie să decidă cînd să tragă, ceea ce îi întîrzie acțiunea. Eroul, pe de altă parte, acționează potrivit unui reflex condiționat și înhață pușca automat, de îndată ce vede mișcîndu-se mina celui rău. Nu am fost de acord cu teoria sa și, în ziua următoare, m-am dus la un magazin de jucării și am cumpărat două puști în gen western. Am jucat cu Bohr, el făcînd pe eroul, și... și-a „ucis” toți studenții.

O altă remarcă a lui Bohr, inspirată de filmele western, se referă la teoria probabilității. El spunea: „Pot să cred că o fată singură poate să pășească pe o brînă îngustă în munți, că poate greși un pas și, căzînd în prăpastie, să izbutească să apuce un brad subțire ce atîrnă de marginea prăpastiei și să se salveze astfel de la o moarte inevitabilă. Pot de asemenea să-mi imaginez că exact în același timp se poate ca un frumos cowboy să călărească de-a lungul aceleiași brîne, și observînd accidentul, să lege lasso-ul pe șeaua calului și să coboare în prăpastie, să salveze fata. Mi se pare însă extrem de improbabil ca în același timp să fie prezent acolo un operator care să înregistreze acest moment palpitant pe peliculă!”

În tinerețea sa, Niels Bohr a fost aproape un atlet, iar în domeniul fotbalului (care se joacă în lumea veche cu o minge rotundă lovită cu piciorul)⁹ era al doilea, întrecut fiind numai de fratele său, binecunoscutul matematician Harald Bohr, care era cel mai bun portar al echipei din Copenhaga.

În timpul vacanței de crăciun, în 1930, am plecat împreună cu Bohr (care era atunci în vîrstă de 45 de ani) să ne întîlnim cu un grup de oameni de știință norvegieni (Rosseland, Solberg și „Bătrînul” Bjerknes) pentru a schia în partea nordică a Norvegiei, dincolo de cercul polar; Bohr a schiat cel mai bine dintre noi.

O întîmplare pe care sînt totdeauna gata să o povestesc sau să o scriu, întîmplare ce se referă la Bohr, este aceea cu privire la seara de la Copenhaga, cînd Bohr, Fru (D-na) Bohr, mai sus pomenitul Casimir și cu mine ne întorceam de la masa de despărțire, dată de Oscar Klein, cu ocazia alegerii sale ca profesor universitar în Suedia natală. La acea oră

⁹ În Statele Unite fotbalul se joacă cu o minge ovală și se lovește și cu mîna și cu piciorul. — *N.T.*

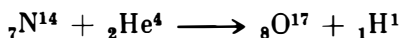
tirzie, străzile oraşului erau pustii (ceea ce nu s-ar putea spune astăzi despre străzile oraşului Copenhaga). În drum spre casă am trecut pe lângă clădirea unei bănci, ai cărei pereţi erau făcuţi din mari blocuri de beton. La colţul clădirii, rosturile dintre blocuri erau suficient de adânci pentru a oferi un loc de proptire pentru un bun alpinist. Casimir, care era un căţărător experimentat, s-a căţărat pînă aproape de etajul al III-lea. Cînd Cas s-a coborît, Bohr, cu toate că era lipsit de experienţă, a pornit să repete isprava. În timp ce dînsul atirna în mod precar la nivelul celui de al doilea etaj şi Fru Bohr, Casimir şi cu mine urmăream cu îngrijorare înaintarea sa, din spate s-au apropiat doi poliţişti cu mîinile pe tocul pistolului. Unul dintre ei, privind în sus, a spus celuilalt: „O, dar e profesorul Bohr!“ după care dîşii s-au îndepărtat liniştiţi în căutarea unor jefuitori de bancă mai periculoşi.

Există o altă anecdotă amuzantă care ilustrează şotiile lui Bohr. Pe uşa de intrare a vilei sale de la ţară, din Tisvilde, dînsul a fixat o potcoavă de cal, despre care, cum este cunoscut, se crede că aduce noroc. Văzînd-o, un vizitator a exclamat: „Fiind un om de ştiinţă de talia d-voastră, credeţi oare într-adevăr că o potcoavă de cal pe uşa de intrare a casei aduce noroc?“ „Nu, răspunse Bohr, fără discuţie nu cred în această superstiţie. Dar ştiţi, adăugă dînsul cu un zîmbet, se spune că aduce noroc chiar dacă nu crezi în ea!“

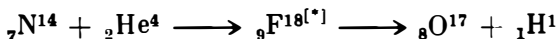
După descoperirea mecanicii ondulatorii şi a formulării de către Heisenberg a principiului de nedeterminare, Bohr şi-a pus toată energia în scopul elaborării semifilozofice a *punctului de vedere dual* asupra microfenomenelor în fizică, conform căruia fiecare entitate fizică, fie ea o cuantă de lumină, un electron sau orice altă particulă atomică, se prezintă ca două feţe ale unei medalii. Pe de o parte ea poate fi tratată ca o particulă; pe de altă parte ea poate fi tratată ca o undă. Vom reveni cu o discuţie mai detaliată a acestei teme, în capitolul V. Prin urmare, Bohr, lucrînd cu asistentul său L. Rosenfeld, a extins relaţia de nedeterminare iniţială, de la o singură particulă, la cazul cîmpului electromagnetic, punînd în felul acesta bazele unei ramuri foarte complicate a teoriei cuantice, cunoscută ca electrodinamica cuantică.

În anii de mai tîrziu, după descoperirea neutronilor, Bohr a început să se intereseze intens de teoria, pe atunci doar par-

țial dezvoltată, a reacțiilor nucleare. El a arătat că particula cu care se bombardează nucleul și care intră în interiorul acestuia, nu azvîrle afară una din particulele din nucleu în același mod în care o bilă de biliard împinge alta, ci rămîne acolo pentru un interval scurt de timp (probabil cam o zecime de miliardime de secundă), distribuindu-și energia de șoc *tuturor* celorlalte particule. Ulterior, această energie poate fi emisă sub forma unei cuante de raze gama sau, fiind colectată în unele dintre particulele nucleare, să le azvîrle pe acestea afară. Astfel, de exemplu, prima reacție nucleară studiată de Rutherford nu trebuie să fie scrisă după cum se obișnuia



ci mai degrabă ca un proces cu trei faze:

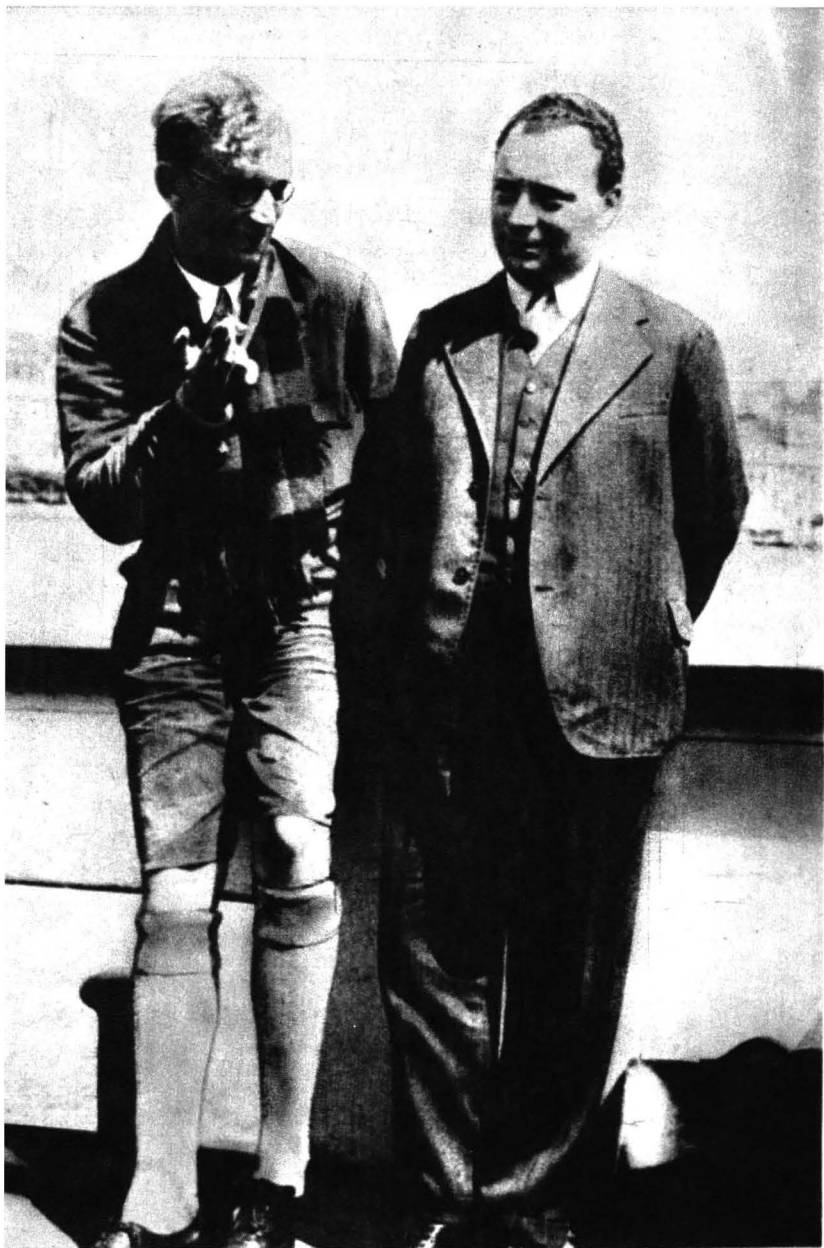


Cînd se scriu simbolurile nucleelor atomice ale diferitelor elemente chimice, indicele de jos din stînga este *numărul atomic* al elementelor; indicii superiori din dreapta sînt *greutățile atomice* ale izotopilor considerați. Produsul intermediar de viață scurtă ${}_9\text{F}^{18[*]}$ (nucleul excitat al izotopului de fosfor) este cunoscut ca un „nucleu compus” și introducerea acestei noțiuni simplifică în mod considerabil analiza reacțiilor nucleare complexe.

În anul 1933, cînd am plecat definitiv din Uniunea Sovietică, am devenit profesor de fizică la Universitatea George Washington, din Washington, unde în anul următor a venit și un vechi prieten, fost student al lui Bohr, Doctorul Edward Teller. Urmînd linia de la Copenhaga, sub auspiciile Universității George Washington și ale Institutului Carnegie din Washington, unde Dr. Merle Tuve lucra la niște experiențe importante de fizică nucleară, se organizau Conferințe anuale de fizică teoretică. Conferința din 1939 a avut o participare deosebit de bună, Niels Bohr (care pe atunci vizita Statele Unite) și Enrico Fermi (vezi capitolul VII) aflîndu-se în primul rînd în sală. Prima zi a conferinței s-a desfășurat liniștit, discutîndu-se probleme curente, dar în ziua a doua a izbucnit o mare agitație. În dimineața respectivă Bohr a venit ceva mai tîrziu, avînd în mînă o radiogramă de la Dr. Lise Meitner, din Stockholm (unde



Niels Bohr și Doamna Bohr pe motocicletă (fotografiat de autor)



G. Gamow și W. Pauli pe un vapor pe un lac elvețian (fotograf necunoscut)

ea emigrase din Germania nazistă). Mesajul anunța că fostul ei colaborator, profesorul Otto Hahn și colaboratorii lui din Berlin au descoperit că bariul și un alt element, care s-a dovedit a fi un izotop al criptonului, au apărut într-o mostră de uraniu bombardată cu neutroni. Dînsa și nepotul ei, teoreticianul Otto Frisch, sugerau că experiența a arătat că nucleul de uraniu, puternic lovit, se sparge în două părți aproximativ egale.

Cititorul probabil că-și imaginează agitația acestei zile și a celorlalte zile ale conferinței. În aceeași noapte, în laboratorul lui Tuve, experiența a fost repetată și s-a constatat că fisiunea uraniului provocată prin ciocnirea cu un singur neutron are loc cu emisia unui sau a mai multor neutroni. Părea deschisă posibilitatea unei reacții în lanț și a eliberării pe scară largă a energiei nucleare. După ce reporterii ziarelor au fost scoși în mod politicos din camera de conferință, s-a trecut la cîntărirea foarte atentă a argumentelor pro și contra reacției de fisiune în lanț. Bohr și cu Fermi, armați cu niște crete mari și stînd în fața tablei, păreau doi cavaleri la o întrecere medievală. În felul acesta a intrat energia nucleară în lumea omului, conducînd la bombele de fisiune cu uraniu, la reactorii nucleari și mai tirziu la armele termonucleare!

Cînd a început cel de al doilea război mondial, Bohr se afla la Copenhaga și el a hotărît „să-l treacă“ sub ocupația nazistă pentru a-și ajuta pe cît posibil mai mult compatrioții. Într-o zi el a fost însă informat de un funcționar danez că urmează să fie arestat de către Gestapo în dimineața următoare. În aceeași noapte, un pescar danez l-a transportat peste Sund, spre țărmul suedez, unde a fost luat de un bombardier britanic de tip Mosquito. Bombardierele Mosquito erau mici și singurul loc pentru Bohr era scaunul liber din coada avionului, ocupat în mod obișnuit de trăgătorul din spate. El putea să comunice cu cel din carlingă numai prin interfon. Undeva, deasupra Mării Nordului, pilotul a vrut să-l întrebe pe Bohr cum se simte, dar nu a putut obține nici un răspuns. Serios alarmat, pilotul de îndată ce a aterizat pe pămîntul englez a alergat la partea posterioară a avionului și a deschis ușa compartimentului trăgătorului din coadă. Bohr era perfect sănătos și dormea adînc!

Venind din Anglia în Statele Unite, Bohr s-a dus de-a dreptul la Los Alamos, pentru a colabora la lucrările privitoare la bomba cu fisiune. Datorită regulilor stricte de securitate, el poseda documente pe numele de Nicholas Baker și era cunoscut sub numele intim de Unchiul Nick. Se povestește că în timpul uneia din vizitele sale la Washington, el s-a întâlnit în ascensorul hotelului cu o tină ră femeie, pe care o văzuse adesea la Copenhaga. Ca soție a unui fizician nuclearist, Dr. von Halban, dînsa vizita adesea Copenhaga împreună cu soțul ei. „Foarte bucuroasă să vă revăd, profesore Bohr“, îl întîmpină dînsa. „Regret, spuse Bohr, dar vă înșelați, mă numesc Nicholas Baker. Dar, adăugă dînsul, încercînd să fie politicoș și fără a încălca regulile de securitate, mi-amintesc de d-voastră, sinteți d-na von Halban“. „Nu, i-o reteză ea, sint d-na Placzek“. Poanta este că dînsa, cu puțin timp înainte, divorțase de primul soț și se căsătorise cu George Placzek, care cu ani înainte a lucrat un timp considerabil cu Bohr.

În vara anului 1960, pe cînd călătoream cu soția în Europa, am mers la Copenhaga pentru a-l vizita pe Bohr și familia sa. El își petrecea vara în vila sa de la țară, în Tisvilde, și ne-a invitat să fim musafirii lui pentru cîteva zile. L-am regăsit același, cum îl cunoșteam, cum l-am văzut prima oară în 1928, dar, desigur mult mai lent în mișcări și mai puțin energic. Am purtat multe discuții interesante cu privire la dificultățile din stadiul prezent de dezvoltare a fizicii. A fost prin urmare un șoc, atunci cînd, vreo doi ani mai tîrziu, am auzit la radio că Niels Bohr a murit.



W. PAULI ȘI PRINCIPIUL DE EXCLUDERE

Unul din cei mai pitorești vizitatori de la Blegdamsvej era fără îndoială Wolfgang Pauli. Născut în Germania, în anul 1900, el și-a petrecut o mare parte din viață ca profesor la Zürich, dar apărea pe neașteptate ca un „drac al inspirației“, oriunde era dezvoltată fizica teoretică. Risul lui răsunător, puțin sardonice, însuflețea orice conferință la care apărea, oricât de insipidă era aceasta la început. El venea întotdeauna cu idei noi, povestind auditoriului despre acestea, în timp ce se plimba încontinuu în spre și de la tablă, legănându-și încet trupul corpolent. Manierele lui au inspirat pe cineva să scrie un poem din care pot să-mi amintesc doar fragmentul următor:

Cu colegii când discută,
Cu tot trupul oscilează;
Tezele când le dispută,
Oscilația-i nu-ncetează.
Iar ideile-i trăsnete
Par a fi din deget supte.

Odată, probabil la indicația unui medic, Pauli a hotărât să scadă în greutate și, ca în tot ceea ce făcea, a reușit foarte iute. Când a reapărut la Copenhaga, cu un număr

de kilograme lipsă, era un om complet deosebit: grav, lipsit de umor și mormăind în loc să ridă. Noi toți l-am presat să se alăture nouă la delicioasele șnițele vieneze și la buna bere Carlsberg și, în mai puțin de două săptămîni, Pauli a redevenit vechiul, veselul Pauli.

Din punct de vedere politic, Pauli era antinazist și nu și-a ridicat niciodată mîna dreaptă pentru salutul „Heil Hitler“, cu o singură excepție. Ținînd un curs la Universitatea din Michigan, în Ann Arbor, el a luat parte la o veselă partidă de canotaj pe lac și, pășind afară din vas pe întuneric, a căzut jos și și-a fracturat din umăr brațul drept. Brațul a fost pus în ghips, cu un suport care-l ținea ridicat la 45°. Cînd a apărut la primul său curs, el ținea creta în mîna stîngă și se adresa studenților în maniera specific nazistă. El a refuzat însă să se lase fotografiat, pînă nu i s-a scos ghipsul.

Pauli și-a început cariera științifică foarte de tînr și la vîrsta de 21 de ani a scris o carte asupra teoriei relativității, care continuă (în ediția revăzută) să fie una din cele mai bune cărți asupra acestui subiect. El este vestit în fizică pentru trei lucruri:

1. *Principiul lui Pauli*, pe care el prefera să-l numească principiul de excludere.

2. *Neutrino-ul lui Pauli*, pe care l-a conceput la începutul deceniului al 3-lea și care timp de trei decenii n-a putut fi detectat experimental.

3. *Efectul Pauli*, un fenomen misterios, care nu a fost și probabil nu va putea fi niciodată înțeles pe o bază pur materialistă.

Este binecunoscut că fizicienii teoreticieni nu pot mînuî instalațiile experimentale; ele se defectează de îndată ce aceștia le ating. Pauli era un atît de bun fizician teoretician încît, în mod curent, în laboratorul în care el doar trecea pragul, se defecta ceva. Odată s-a întîmplat un eveniment misterios, care la prima privire nu părea să fie conectat cu prezența lui Pauli, eveniment care a avut loc în laboratorul din Göttingen, al profesorului J. Franck. Într-o după amiază de vreme, fără nici o cauză aparentă, un aparat complicat pentru studiul fenomenului atomic s-a defectat. Franck i-a scris într-un ton plin de humor despre această întîmplare lui Pauli, pe adresa din Zürich; după un oarecare

timp a primit răspunsul într-un plic cu o ștampilă daneză. Pauli scria că se află în vizită la Bohr și că în timpul defecțiunii din laboratorul lui Franck, trenul cu care călătorea se oprise pentru cîteva minute în gara din Göttingen. Puteți să credeți sau nu această anecdotă, să știți însă că sint multe alte observații privitoare la realitatea efectului Pauli!

COTE PENTRU NIVELELE ELECTRONILOR

Principiul lui Pauli, spre deosebire de efectul Pauli, este mult mai bine stabilit și se referă la mișcarea electronilor în atomi. În capitolele anterioare, am descris orbitele cuantice sau, într-un limbaj mai modern, stările de oscilație, cuantice, în câmpul coulombian de forțe care înconjură nucleul atomic¹. Deoarece atomul de hidrogen posedă un singur electron, acest electron este liber să ocupe oricare din stările de energie posibile și, în absența unei excitații exterioare, se așează în mod natural pe starea de cea mai joasă energie, cît mai aproape de nucleu. Dacă este ridicat de către o forță externă pe o oarecare stare de energie mai înaltă, el recade înapoi în starea inițială cea mai joasă, emițînd diferitele linii ale spectrului hidrogenului. Ce se întîmplă însă în atomii care posedă 2, 3 sau mai mulți electroni? În capitolul II am dedus două formule pentru atomul de hidrogen aflat în starea de energie minimă ($n = 1$). Raza orbitei sau, mai exact, raza medie a funcției continue care descrie starea acestuia este dată de

$$r_1 = \frac{h^2}{4\pi^2 e^2 m}$$

și energia minimă de

$$E_1 = \frac{4\pi^2 e^4 m}{h^2}$$

Aceste formule sint obținute în presupunerea că forța electrică este egală cu e^2/r^2 .

¹ Vezi capitolul următor.

Să presupunem acum că un singur electron se rotește în jurul unui nucleu cu sarcina Ze , unde Z este numărul atomic al acestuia. În cazul acesta, forța va fi Ze^2/r^2 în loc de e^2/r^2 și în formulele de mai sus va trebui să înlocuim pe e^2 cu Ze^2 și pe e^4 cu Z^2e^4 . O dată cu creșterea numărului atomic Z , razele stării fundamentale vor scădea proporțional cu Z , iar valorile absolute ale energiilor acestora vor crește proporțional cu Z^2 . Dacă în loc de un singur electron vom introduce cei Z electroni și dacă ei toți s-ar îngrămădi pe nivelul cel mai de jos, atomii care formează sistemul natural al elementelor ar deveni din ce în ce mai mici, și din ce în ce mai strâns legați. Desigur, argumentînd în felul acesta, va trebui să ținem seama că respingerea electrostatică dintre electroni va tinde să-i despartă, dar se poate arăta ușor că această respingere nu este suficient de puternică pentru a împiedica elementele grele să se strîngă în dimensiuni considerabil mai mici. Rezultă că volumele² atomilor ar trebui să descrească continuu și destul de repede, pornind de la hidrogen la uraniu, așa cum indică linia întreruptă din fig. 15 *a*. Linia continuă din aceeași figură, care reprezintă datele experimentale, nu seamănă de loc cu cealaltă. Ea arată doar o pantă foarte lentă și este caracterizată în principal prin forma sa dințată cu virfuri foarte ascuțite în pozițiile corespunzătoare gazelor nobile (He, Ne, Ar, Kr, Xe etc.) care, așa cum cunoaște orice chimist, sînt inerte și formează foarte greu compuși cu alte elemente sau între ele. De asemenea, dacă toți electronii dintr-un atom s-ar acumula pe nivelul de energie minim, dificultatea extragerii unui electron din atom ar crește repede de la elementele ușoare la cele grele de-a lungul sistemului natural (linia punctată din fig. 15 *b*). Nici aceasta nu seamănă de loc cu curba observată a potențialelor de ionizare care caracterizează dificultatea extragerii și care este reprezentată în aceeași figură printr-o linie continuă. În plus, comparînd aceste două curbe, vom observa că dificultatea maximă de extragere a unui electron atomic are loc în aceleași locuri în care volumele atomice au valorile cele mai mici. Astfel, lucrurile apar ca și cum secvența elementelor chimice poate

² Acestea pot fi calculate din greutățile atomice cunoscute și din densitățile diferitelor elemente, divizînd greutatea unui cm^3 dintr-un element dat, prin greutatea atomilor acestuia.

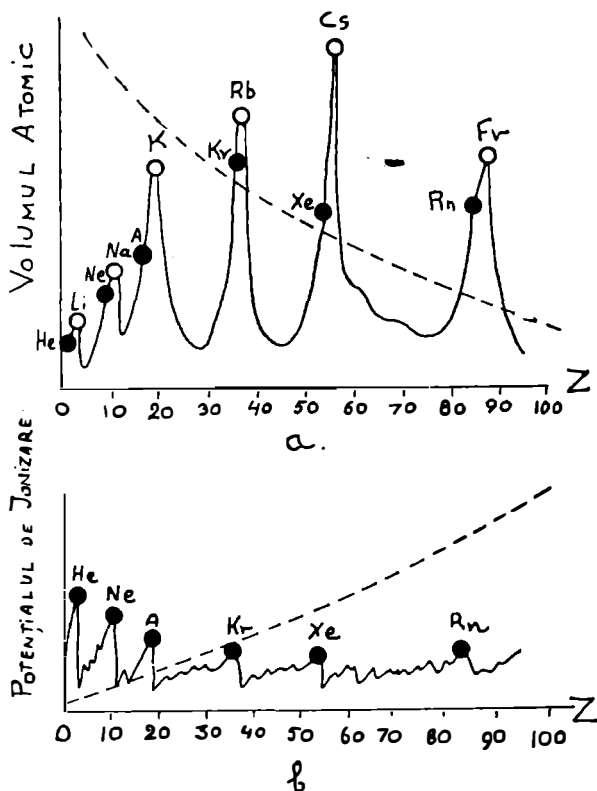


FIG. 15.

Variația volumelor atomice și a potențialelor de ionizare de-a lungul sistemului natural al elementelor. Cercurile negre corespund gazelor nobile, care, avînd învelișuri saturate, au legăturile cele mai puternice. Cercurile albe sînt metalele alcaline care încep să formeze învelișuri noi.

fi reprezentată printr-un șir de corpuri cu dimensiuni care variază periodic și cu rezistență opusă eliberării electronilor proprii, de asemenea periodică. Rezultă concluzia că prin adăugarea unui număr din ce în ce mai mare de electroni, volumele ocupate de diferitele stări cuantice se concentrează, dar numărul stărilor ocupate de electroni crește,

astfel că diametrul total exterior al atomului rămâne aproximativ constant. Prin urmare, trebuie să existe un principiu fizic fundamental potrivit căruia electronii atomici sînt împiedicați de a se îngrămădi pe starea cuantică minimă; de îndată ce „cota“ pentru un nivel dat este umplută, electronii suplimentari trebuie să se aranjeze pe alte stări cuantice, de energie mai înaltă. Pauli a sugerat că lucrurile pot fi puse în ordine în mod satisfăcător dacă se admite *ca numai doi electroni* să poată ocupa orice stare cuantică dată, descrisă prin trei numere cuantice: radial n_r , azimutal n_ϕ , și orientațional³ n_θ . În teoria inițială a lui Bohr, în cadrul căreia a fost formulat pentru prima oară principiul lui Pauli, aceste trei numere cuantice corespundeau la diametrele medii, excentricitățile și orientările spațiale ale orbitelor cuantice ale electronilor. În mecanica ondulatorie⁴ ei reprezintă numărul nodurilor în mișcarea oscilatorie tridimensională complicată a funcțiilor Ψ .

Folosind principiul lui Pauli, Bohr și colaboratorii lui (incluzînd bineînțeles pe Pauli însuși) au fost în stare să construiască modelele tuturor atomilor, de la hidrogen la uraniu. Ei au reușit nu numai să explice modificarea periodică a volumelor atomice și a potențialelor de ionizare, ci să explice și toate celelalte proprietăți ale atomilor, afinitățile lor chimice reciproce, valențele lor și alte proprietăți pe care, cu mulți ani înainte, le-a însumat și le-a sistematizat pe o bază pur empirică chimistul rus D.I. Mendeleev, în cadrul sistemului periodic al elementelor, care-i poartă numele. Toate aceste dezvoltări se află în afara scopului acestei mici cărți, a cărei țintă principală o constituie descrierea ideilor noi, revoluționare, și nu atât a consecințelor lor detaliate.

³ Pentru o mai mare simplitate, ne-am îndepărtat aici de la notațiile curente ale numerelor cuantice. În orice ramură științifică terminologia devine așa de împovăraătoare în procesul progresului, încît este extrem de dificil s-o reprezinti într-un mod simplu pentru un cititor care întilnește toate aceste noțiuni complicate pentru prima oară.

⁴ Vezi capitolul următor.

Studiile și interpretările spectrelor atomice, pe baza teoriei lui Bohr care se folosea de trei numere cuantice (absolut natural pentru spațiul tridimensional!) pentru a descrie mișcarea electronilor atomici, s-au dezvoltat cu succes pînă cînd, la începutul deceniului al treilea, s-a dovedit brusc că trei numere cuantice nu mai erau suficiente. Studiile efectului Zeeman (scindarea liniilor spectrale datorită cîmpurilor magnetice puternice) puneau în evidență că există mai multe componente spectrale decît cîte puteau fi explicate cu ajutorul a trei numere întregi; pentru a explica existența acestora, a fost introdus un al patrulea număr cuantic. Inițial a fost denumit „numărul cuantic intern“, un nume tot așa de bun ca și oricare altul, fiindcă nimeni nu putea să explice multipleții suplimentari. În 1925 însă doi fizicieni olandezi, Samuel Goudsmit și George Uhlenbeck, au făcut o propunere îndrăzneată. Această scindare suplimentară a liniilor, sugerau ei, nu se datorează vreunui număr cuantic suplimentar care descrie orbita electronului în atom, ci electronului însuși. Încă de la descoperirea sa, electronul fusese considerat ca un punct caracterizat doar prin masă și prin sarcina sa electrică. Nu l-am putea oare însă considera ca pe un mic corp încărcat electric care se rotește în jurul axei sale ca un titirez? În felul acesta el ar avea un oarecare moment unghiular și un moment magnetic precum are fiecare sarcină care se rotește. O orientare diferită a spinului electronului (cum a fost denumit) față de planul orbitei sale ar explica atunci componentele adiționale, multipleții suplimentari.

S-a descoperit curînd că propunerea făcută corespunde și că atribuind electronului o valoare numerică corespunzătoare pentru spin (adică un moment mecanic unghiular) și un moment magnetic se pot explica toate componentele suplimentare ale liniilor găsite de către experimentatori. Momentul magnetic al electronului cu spin a avut amabilitatea de a fi egal cu așa-numitul *magneton al lui Bohr*, adică cantitatea minimă de magnetism care putea fi cauzată prin rotirea sa în jurul nucleului. Încurcături au apărut însă în ce privește momentul unghiular mecanic al electronului cu

spin, care a reieșit că este doar *jumătate* din momentul unghiular obișnuit $h/2\pi$ al orbitelor atomice.

S-au făcut multe încercări de depășire a acestei dificultăți și problema a fost în cele din urmă rezolvată de P.A.M. Dirac — cu patru ani mai târziu — pe o cale cu totul neconvențională (vezi capitolul VI). Motivul pentru care introducerea electronului cu spin modifica principiul lui Pauli al mișcării electronului atomic poate fi înțeles în modul următor. După cum vă aduceți aminte, acest principiu postula că *numai doi* electroni pot ocupa orice orbită cuantică dată. De ce doi? După descoperirea electronului cu spin, principiul inițial al lui Pauli a fost completat cu afirmația: „*numai doi care posedă spin opus*“, adică cei care se roteesc în sens opus.

Situația este ilustrată grafic în fig. 16. Desenul *a* reprezintă tabloul vechi, în care doi electroni punctiformi, e_1 și e_2 , se mișcă de-a lungul aceleiași orbite. În desenul *b* avem reprezentarea mai recentă, anume că doi electroni se pot mișca de-a lungul aceleiași orbite numai dacă unul din ei, e_1 , se rotește în jurul axei sale în același sens în care se rotește în jurul nucleului, în timp ce al doilea, e_2 , se rotește în direcție opusă. Putem adăuga că desenul *b* nu este riguros corect, deoarece interacțiunea dintre momentul magnetic al unui electron și câmpul magnetic din interiorul atomului, în care se mișcă, modifică ușor orbita, astfel că avem de fapt două orbite, desenul *c*, fiecare avînd un singur electron. Astfel, principiul inițial al lui Pauli poate fi reformulat în sensul că *permite ca pe fiecare orbită, atunci cînd se ia în considerare ușoara scindare a orbitei inițiale, să existe un singur electron.*

PAULI ȘI FIZICA NUCLEARĂ

Trecem acum la un câmp complet diferit al activității lui Pauli în știință, la contribuția sa în domeniul fizicii nucleare. După cum fiecare cunoaște — sau măcar ar trebui să cunoască — elementele radioactive emit trei feluri de radiații: alfa (α), beta (β) și gama (γ). Procesul principal al dezintegrării radioactive îl constituie emisia de particule alfa fragmente mari de nuclee instabile, care s-au dovedit a fi, după cum a arătat Rutherford, nuclee de atomi de heliu. Pe

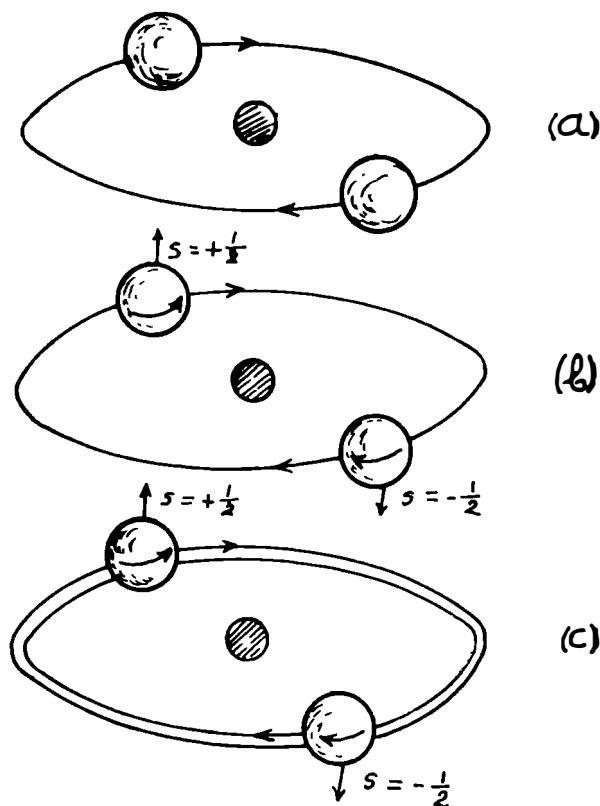


FIG. 16.

Mișcarea a doi electroni de-a lungul aceleiași orbite potrivit (a) principiului inițial al lui Pauli (una și aceeași orbită nu poate fi ocupată de mai mult de doi electroni); și (b) principiul lui Pauli corectat (doi electroni care ocupă aceeași orbită trebuie să aibă spin opus, adică să se rotească în jurul axei proprii în direcții opuse); și potrivit (c) principiului lui Pauli reformulat în care, datorită forțelor magnetice care apar de la momentele magnetice ale electronilor, orbitele nu sînt identice și pe fiecare nivel de energie este permis un singur electron.

de altă parte, particulele β sînt constituite din electroni care sînt uneori emiși de nuclee, ca urmare a unei dezintegrări α pentru a restabili balanța dintre sarcină și masă care a

fost tulburată de emisia unei particule α . În sfârșit, razele γ sînt constituite din unde electromagnetice scurte, care rezultă din perturbările interne provocate de emisiile α și β . Pentru un element radioactiv dat, particulele α posedă exact aceeași energie, corespunzătoare la diferențele de energie dintre nucleele mamă și fiică. Razele γ posedă linii complexe foarte nete, mult mai nete, în fapt, decît liniile spectrelor optice.

Toate aceste manifestări indică faptul că nucleele atomice sînt sisteme cuantificate similare cu atomii, cu deosebirea că au dimensiuni mai mici; deoarece dimensiunile lor sînt mai mici, transformările care le suferă, potrivit legilor cuantice, implică energii mult mai mari. A fost însă o teribilă surpriză pentru fizicieni descoperirea făcută de James Chadwick, în 1914, care a arătat că, spre deosebire de particulele α și de razele γ emise de nucleele radioactive, particulele β nu posedă energii bine determinate. Ba, dimpotrivă, spectrul lor energetic se întinde în mod continuu, practic de la zero pînă la valori foarte mari (fig. 17). Posibilitatea ca această împrăștiere a energiilor să se datoreze unor oarecari pierderi interne, suferite de particulele β în procesul de eliberare din materialul radioactiv, a fost în mod definitiv respinsă datorită unor experiențe foarte îngrijite. Și astfel, fizicienii s-au găsit în fața unei situații în care conturile de energie intrată și cheltuită nu se compensau. Niels Bohr, care a fost primul care s-a ciocnit cu aceste date experimentale, s-a situat pe punctul de vedere radical, potrivit căruia, dacă experiențele indică aceasta, atunci într-adevăr legea conservării energiei nu este respectată în cazul emisiei β și (probabil) în cazul proceselor de absorbție β . Într-adevăr, epoca respectivă era epoca în care, sub presiunea teoriilor noi, a relativității și a cuantelor, atît de multe legi ale fizicii clasice au fost înlăturate, încît nici una din legile fizicii clasice nu părea a fi de neclintit. Bohr a încercat chiar să utilizeze această așa pretinsă neconservare a energiei în procesele de emisie β pentru a explica aparenta producere eternă de energie în stele. Conform cu acest punct de vedere, puțin cunoscut și niciodată publicat, stelele ar conține în interiorul lor miezuri mari de materii nucleare, avînd aceleași proprietăți ca și nucleele atomice obișnuite, dar avînd dimensiuni cu mult mai mari (mai degrabă de ordi-

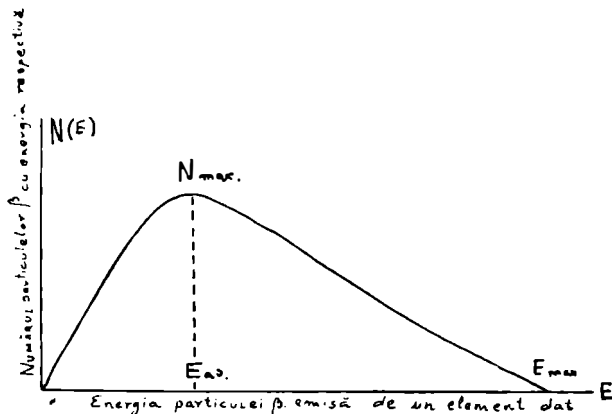


FIG. 17.

Curbă tipică de distribuție a energiei unui emițător β tipic.

nul kilometrilor, decît de ordinul a 10^{-12} cm). Aceste miezuri ale stelelor, presupuse a fi instabile, ar emite particule β de energie bine determinată. Ele ar fi înconjurate de materie obișnuită, într-o stare de ionizare completă (de plasmă, cum am spune astăzi) constînd din electroni liberi de mare energie și din nuclee simple, despuiate. Energia electronilor care formează baza acestor învelișuri stelare era determinată cu ajutorul relației clasice

$$E = \frac{3}{2} kT$$

unde k este constanta lui Boltzmann, iar T temperatura la baza învelișului⁵. Pe de altă parte, particulele β emise de la suprafața practic plană a miezului nuclear au totdeauna *aceeași energie*, determinată de proprietățile interne ale fluidului nuclear. Așa că trebuie să existe un echilibru dinamic

⁵ Conform cu teoria mecanică a căldurii, dezvoltată la mijlocul secolului trecut de Boltzmann și Maxwell, „căldura nu este nimic altceva decît mișcarea moleculelor din care este format materialul corpurilor“. Ei au găsit că energia mișcării termice (raportată la n.oleculă) este proporțională cu temperatura absolută a acesteia — adică cu temperatura măsurată la „zero absolut“, de -273°C . Coeficientul de proporționalitate, determinat pe cale empirică (să , mai exact, $2/3$ din acesta), a fost denumit constanta lui Boltzmann.

între miezul nuclear și învelișul gazos ionizat (plasmă) similar cu echilibrul dintre apă și vaporii saturați de la suprafața acesteia. Numărul particulelor β emise de miezul radioactiv era egal cu numărul electronilor liberi, absorbiți de acesta din înveliș. Dar, în timp ce energia electronilor liber absorbiți din anvelopă este determinată de temperatura acesteia, T , energia particulelor β emise de către miez este totdeauna aceeași, corespunzătoare unei anumite temperaturi nucleare universale, T_0 . Prin urmare, pentru $T < T_0$ are loc un flux constant de energie din miezul nuclear în anvelopă și acest flux pătrunzind pînă la suprafața stelei, menține temperatura ridicată a acesteia. În virtutea neconservării energiei în procesele de emisie β în miezul nuclear nu se schimbă nimic și stelele ar putea să radieze etern. Bohr vorbea despre această teorie a sa într-o manieră ușor critică, dar apărea ca și cum el nu ar fi fost prea surprins dacă aceasta s-ar fi dovedit adevărată.

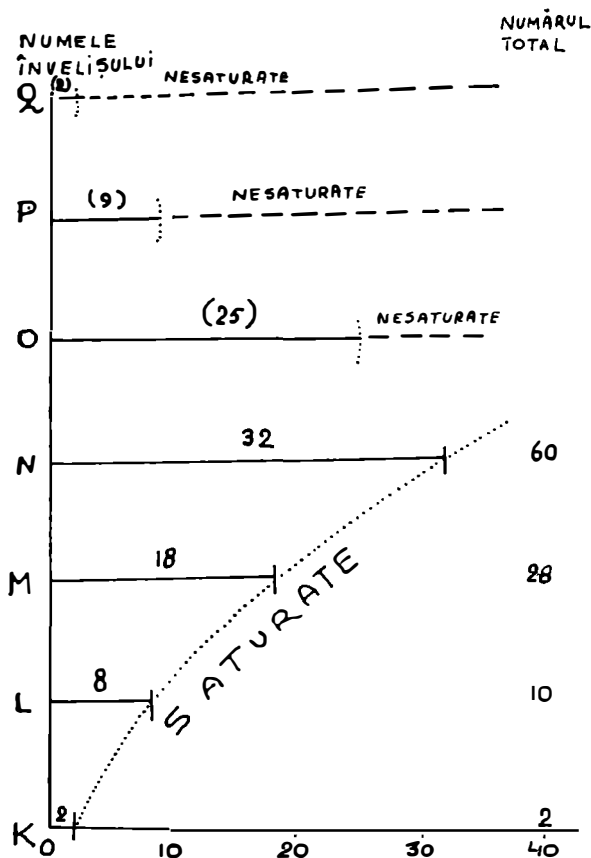
NEUTRINO-UL

Pauli, care nu putea fi acuzat de conservatism, indiferent în ce sens, era, totuși, de cu totul altă părere decît Bohr. El prefera să presupună că balanța energiei, violată datorită continuității spectrului razelor β , era restabilită datorită emisiei unor particule de altă natură, deși necunoscute, pe care el le denumea „neutroni”. Numele acestui „neutron al lui Pauli” a fost ulterior schimbat în „neutrino”, după descoperirea lui Chadwick a ceea ce astăzi este denumit neutron. Despre neutrini s-a presupus a fi particule care nu poartă sarcină electrică și care nu posedă masă (sau cel puțin nu o masă despre care să se poată vorbi). Despre aceștia s-a presupus că sînt emiși în perechi cu particulele β , de o asemenea manieră încît suma energiilor lor și ale particulelor β este întotdeauna aceeași, fapt care fără discuție ar restabili buna, vechea lege a conservării energiei. Dar, datorită lipsei de sarcină și masei lor nule, ele sînt practic nedetectabile, strecurîndu-se printre degetele celor mai abili experimentatori. În afara lui Bohr, un alt neutrinofob a fost P. Ehrenfest și, pe această temă, între aceștia trei a avut loc o imensă și aprinsă discuție verbală și

a fost purtată o corespondență voluminoasă, niciodată publicată.

Pe măsura trecerii anilor, se adunau din ce în ce mai multe dovezi în favoarea neutrinilor lui Pauli, cu toate că dovezile erau indirecte. De-abia în anul 1955, doi fizicieni de la Los Alamos, F. Reines și C. Cowan au stabilit, în afara oricărei posibilități de îndoială, existența neutrinilor, capturându-i în timp ce aceștia erau emiși din pilele atomice ale proiectului Savannah River al Comisiei pentru Energia Atomică. Ei au stabilit că interacțiunea dintre neutrini și materie este atât de slabă încît, pentru a reduce intensitatea unui fascicul de neutrini la jumătate, ar trebui un ecran de fier de grosimea a cîtorva ani-lumină. În prezent, neutrinii ocupă un loc din ce în ce mai mare în studiile referitoare la particulele elementare și la fenomenele astrofizice; s-ar putea ca ei să devină cea mai importantă particulă elementară din fizică. S-a stabilit că neutrinii ca și electronii se comportă ca niște mici sfîrleze, avînd spini, iar momentele lor cinetice sînt egale cu ale electronilor. Dar, deoarece neutrinii nu posedă sarcină electrică, momentul lor magnetic este egal cu zero.

Ulterior, s-a stabilit experimental că protonii și neutronii posedă același spin ca și electronii și se supun principiului lui Pauli. Ultimul fapt are o importanță foarte mare în problema structurii interne a nucleelor atomice, nucleecare sînt formate prin aglomerarea unui număr variat de protoni și neutroni, strinși puternic împreună datorită forțelor nucleare. Așa cum a arătat pentru prima oară, în 1934, G. Gamow secvența naturală a nucleelor atomice de la hidrogen la izotopii uraniului prezintă variații periodice ale diferitelor proprietăți ale acestora, variații similare cu variațiile proprietăților chimice ale atomilor din cadrul sistemului periodic al elementelor, al lui Mendeleev, dar mult mai puțin accentuate. Această periodicitate indică faptul că nucleeele atomice trebuie să posede o structură de tipul păturii, similară cu aceea a structurii învelișurilor electronice ale atomilor, dar probabil mult mai complicată. Situația este complicată în cazul de față de faptul că în timp ce învelișurile atomice sînt formate dintr-un singur tip de particule, anume din electroni, nucleeele sînt formate din două tipuri de particule, neutroni și protoni, și de faptul că principiul de excludere al lui Pauli se aplică

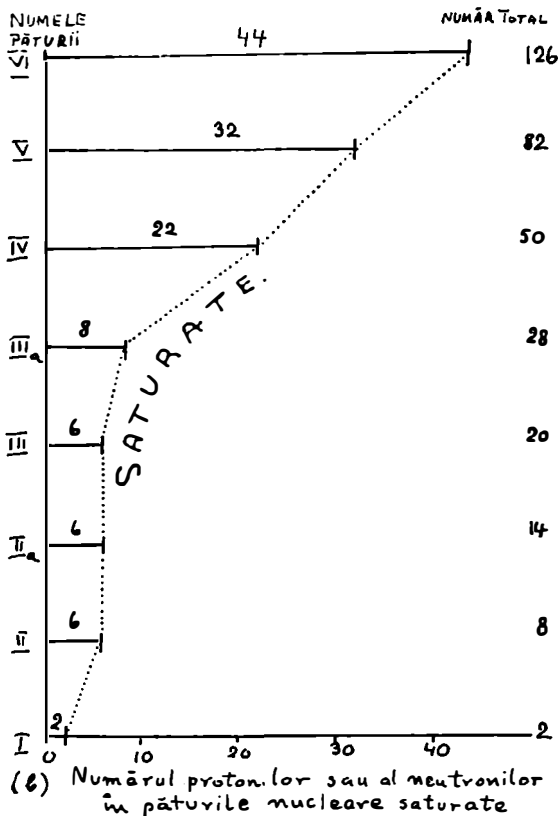


(a) Numărul electronilor în învelișurile atomice saturate

FIG. 18.

O comparație între (a) saturația învelișurilor electronice în diagrama Bohr-Coster a secvenței atomilor și (b) diagrama lui Mayer-Jensen a saturației păturilor protonilor și neutronilor în secvența nucleelor atomice.

fiecărui tip în parte, separat. Astfel, orice stare dată de energie, caracterizată prin trei numere cuantice, poate să accepte doi protoni (cu spin opus) împreună cu doi neu-



troni (de asemenea cu spin opus) și avem de fapt două sisteme de pături unul pentru protoni și unul pentru neutroni, care se suprapun unele peste altele. Există încă și o altă dificultate. Datorită împachetării strinse a protonilor și neutronilor în nucleu, calculul nivelelor energetice devine considerabil mai complicat. Problema a fost în cele din urmă rezolvată în 1949 de M. Goeppert Mayer și H. Jensen și alții, care au putut să demonstreze că păturile de neutroni, ca și cele de protoni din interiorul nucleelor au fiecare capacități de 2, 8, 14, 20, 28, 50, 82 și 126 particule fiecare, așa cum se arată schematic în fig. 18. Aceste nu-

mere cunoscute sub numele de „numere magice“ au permis fizicienilor să înțeleagă în mod complet periodicitatea observată în structura nucleelor.

O altă aplicație importantă a principiului lui Pauli poate fi găsită în lucrarea lui P.A.N. Dirac, care a utilizat acest principiu pentru a explica stabilitatea materiei, ceea ce se va arăta în capitolul VI. Pe baza acestei teorii, Dirac a ajuns la concluzia că fiecărei „particule normale“, ca de exemplu electronului, protonului, neutronului și fiecăreia din hoarda de particule descoperite în ultimul deceniu, trebuie să-i corespundă o „antiparticulă“, avînd exact aceleași proprietăți fizice, dar sarcină electrică opusă. Despre acestea se va discuta mai în amănunt în capitolele VI și VIII.

Pentru a încheia acest capitol, este suficient să spunem că este tot atît de dificil să fie găsită o ramură a fizicii moderne în care să nu se utilizeze principiul lui Pauli, pe cît este de greu să se găsească un om tot atît de înzestrat, simpatîc și amuzant, pe cît a fost Wolfgang Pauli.



L. DE BROGLIE
ȘI UNDELE
PILOT

Louis Victor, duce de Broglie, născut la Dieppe în 1892, și care a devenit prinț de Broglie în urma morții unui frate mai mare, a avut o carieră științifică neobișnuită. Ca student la Sorbona, el a hotărât să-și închine viața studiului istoriei evului mediu, dar izbucnirea primului război mondial l-a determinat să intre în rândurile armatei franceze. Fiind un om cu formație intelectuală, el a fost utilizat într-una din unitățile de radiocomunicație, care la timpul respectiv constituia o noutate, fapt care i-a schimbat interesul de la catedralele gotice la undele electromagnetice. În 1925 el a prezentat o teză de doctorat care conținea idei atât de revoluționare referitoare la o modificare a teoriei inițiale a lui Bohr asupra structurii atomice, încât cei mai mulți fizicieni o priveau cu mult scepticism; într-adevăr, teoria lui de Broglie a fost denumită ironic „la Comédie Française“.

Datorită faptului că a lucrat cu undele radio în timpul războiului și fiind totodată un cunoscător al muzicii de cameră, de Broglie a hotărât să privească atomul ca pe un fel de instrument muzical care, potrivit cu construcția sa, poate să emită un anumit ton fundamental și o secvență de armonice. Deoarece, la timpul respectiv era foarte bine

stabilit că orbitele electronice ale lui Bohr caracterizează diferitele stări cuantice ale unui atom, el le-a ales pe acestea ca structură de bază pentru schema sa ondulatorie. A presupus că fiecare electron, mișcându-se pe o orbită dată, este acompaniat de o undă pilot misterioasă (cunoscută astăzi ca undă de Broglie), undă care se întinde de-a lungul întregii orbite. Prima orbită cuantică poartă o singură undă, a doua două unde, a treia trei ș.a.m.d. Astfel, lungimea de undă a primei orbite trebuie să fie egală cu lungimea $2\pi r_1$ a primei orbite cuantice, lungimea celei de a doua unde trebuie să fie egală cu jumătate din lungimea celei de a doua orbite, $\frac{1}{2} 2\pi r_2$, etc. În general, a n -a orbită cuantică poartă n unde fiecare, cu lungimea $\frac{1}{2} 2\pi r_n$ fiecare.

După cum am văzut în capitolul II, raza celei de a n -a orbite a atomului lui Bohr este

$$r_n = \frac{1}{4\pi^2} \frac{h^2}{me^2} n^2$$

Din egalitatea dintre forța centrifugă datorită mișcării orbitale și atracția electrostatică dintre particule încărcate, obținem:

$$\frac{mv_n^2}{r_n} = \frac{e^2}{r_n^2}$$

sau

$$e^2 = mv_n^2 r_n$$

Înlocuind această valoare a lui e^2 în formula inițială, obținem

$$r_n = \frac{1}{4\pi^2} \frac{h^2 n^2}{m} \frac{1}{mv_n^2 r_n}$$

sau

$$(2\pi r_n)^2 = \frac{h^2 n^2}{m^2 v^2}$$

În fine, extrăgând rădăcina pătrată din ambele părți ale acestei ecuații, obținem:

$$2\pi r_n = n \frac{h}{mv_n}.$$

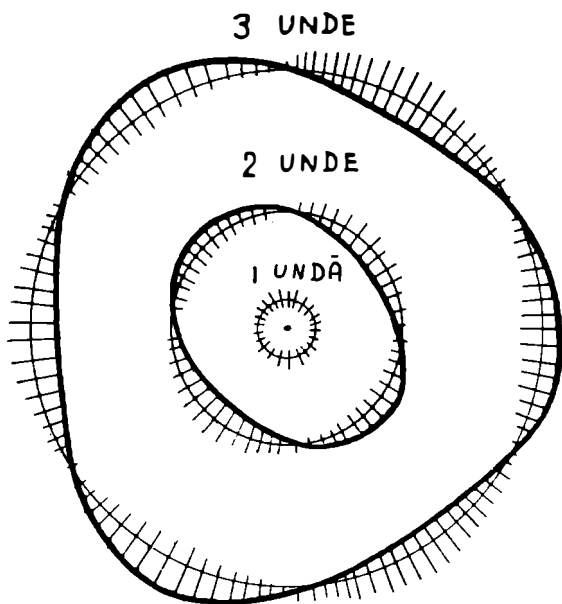


FIG. 19.
Undele de Broglie amplasate pe orbitele cuantice în modelul atomic al lui Bohr.

Astfel, dacă lungimea λ a unei care acompaniază electronul este egală cu constanta h , a lui Planck, împărțită prin impulsul particulei mv , atunci

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

iar de Broglie putea să satisfacă dorința sa de a introduce unde de o astfel de natură încît 1, 2, 3 dintre ele să poată intra exact în 1, a 2-a, a 3-a din orbitele cuantice ale lui Bohr (fig.19). Rezultatul obținut este echivalent matematic cu condiția cuantică inițială a lui Bohr și nu aduce, din punct de vedere fizic, nimic nou — nimic decît o idee: mișcarea electronilor de-a lungul orbitelor cuantificate ale lui Bohr este acompaniată de unde misterioase avînd lungimea determinată de masa și viteza particulelor aflate în mișcare. Dacă aceste unde reprezintă un fel de realitate fizică, ele

trebuie să acompanieze de asemenea și particulele care se mișcă liber în spațiu, caz în care existența sau inexistența lor poate fi probată prin experiență directă. Într-adevăr, dacă mișcarea electronilor este ghidată de *unde de Broglie* în condiții corespunzătoare un fascicul de electroni va demonstra fenomene de difracție similare cu acelea caracteristice pentru fasciculele de lumină. Fasciculele de electroni accelerate de tensiuni electrice de câțiva kilovolți (care sint utilizate în mod curent în experiențele de laborator) vor fi acompaniate, potrivit formulei lui de Broglie, de unde pilot cu lungimi de undă de 10^{-8} cm, lungimi comparabile cu lungimile de undă ale razelor X obișnuite. Aceste lungimi de undă sint prea scurte pentru a da fenomene de difracție în rețelele optice obișnuite și trebuiesc studiate cu ajutorul tehnicii standard din spectroscopia razelor X. În metoda aceasta, fasciculul incident este reflectat de suprafața unui cristal, iar straturile cristaline vecine, amplasate la o distanță de circa 10^{-8} cm, au acelaș rol ca și liniile mai îndepărtate din rețelele optice de difracție (fig. 20). Această experiență a fost făcută, simultan și independent, de Sir George Thomson (fiul lui Sir J.J.Thomson) în Anglia și de G.Davisson și L.H.Germer în Statele Unite, care au folosit un dispozitiv de cristal asemănător cu cel al lui Bragg și Bragg și au înlocuit doar fasciculul de raze X cu un fascicul de electroni cu o viteză dată. Drept rezultat al experiențelor s-a obținut pe un ecran (sau pe o placă fotografică) un desen caracteristic de difracție, iar benzile de difracție deveneau mai late sau mai înguste atunci cînd viteza electronilor incidenți era crescută sau micșorată. În toate cazurile, lungimea de undă măsurată a coincis în tocmai cu cea care rezulta din formula lui de Broglie. În felul acesta, undele de Broglie au devenit o realitate fizică indiscutabilă, cu toate că nimeni nu înțelegea ce ar putea ele să fie.

Ceva mai tirziu, un fizician german, Otto Stern, a demonstrat existența fenomenelor de difracție și în cazul fasciculelor atomice. Deoarece atomii sint de mii de ori mai masivi decît electronii, era de așteptat ca undele de Broglie să fie, pentru aceeași viteză, corespunzător mai scurte. Pentru a face ca lungimile de undă de Broglie ale atomilor să fie

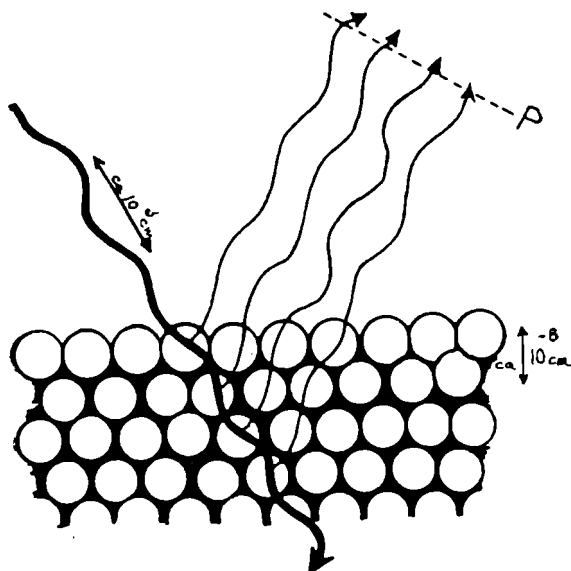


FIG. 20.

O undă incidentă, fie ea o undă electromagnetică scurtă (raze X) sau o undă de Broglie asociată unui fascicul de electroni rapizi, la trecerea prin straturile succesive ale rețelei cristalului dă naștere la unde reflectate. În funcție de unghiul de incidență, apar franjuri întunecoase și luminoase de interferență (P este planul fazelor).

comparabile cu distanțele dintre straturile cristalului (circa 10^{-8} cm), Stern a decis să folosească mișcarea termică a atomilor, deoarece putea să regleze în mod foarte simplu viteza acestora, modificând temperatura gazului. Sursa era constituită dintr-un cilindru ceramic încălzit de o spirală electrică bobinată în jurul acestuia. La un capăt al cilindrului care era închis, era prevăzută o mică fantă prin care atomii scăpau cu viteza lor termică într-un dispozitiv mult mai mare, vidat, și în zborul lor prin spațiu ei se loveau de o bucată de cristal amplasată în drumul lor. Atomii reflectați în diferitele direcții izbeau niște plăci de metal răcite cu aer lichid, iar numărul de atomi ce cădeau pe diferitele plăci era numărat printr-o metodă complicată de microanaliză chimică. Trasând curba care reprezenta numărul de atomi

trimiși în diferitele direcții, în funcție de unghiul de reflexie, Stern a obținut și de data aceasta un desen perfect de difracție, corespunzând întocmai lungimilor de undă calculate cu formula lui de Broglie. Iar benzile deveneau mai largi sau mai înguste, atunci când se modifica temperatura cilindrului.

Pe la sfîrșitul deceniului al treilea, cînd lucram la Universitatea Cambridge cu Rutherford, am hotărît să-mi petrec vacanța de crăciun la Paris (unde nu fusesem încă nici odată). I-am scris lui de Broglie, spunîndu-i că aș dori foarte mult să-l întîlnesc, pentru a discuta unele probleme ale teoriei cuantelor. El mi-a răspuns că universitatea va fi închisă, dar că va fi bucuros să se întîlnească cu mine la din-sul acasă. Locuia într-un magnific castel familial, în distinsa suburbie pariziană Neuilly-sur-Seine. Ușa a fost deschisă de un majordom cu aer solemn.

— „*Je veux voir Professeur de Broglie*“.

— „*Vous voulez dire, Monsieur le Duc de Broglie*“, a răspuns majordomul.

— „O.K., *le Duc de Broglie*“, am spus, și am fost invitat în casă¹.

De Broglie, îmbrăcat într-o haină de casă, din mătase, m-a primit în cabinetul lui de studii somptuos mobilat și am început să discutăm fizică. El nu vorbea de loc englezește; franceza mea era mai degrabă săracă. Dar, într-un chip oarecare, în parte utilizînd frînturile mele de franceză, în parte scriînd formulele pe hîrtie, am reușit să-i comunic ceea ce doream să-i spun și să înțeleg comentariile sale. În cursul aceluiaș an, de Broglie a venit la Londra pentru a ține o conferință la Royal Society și, desigur, am făcut parte din auditoriu. El a avut o dicțiune strălucitoare, într-o engleză perfectă, doar cu un foarte slab accent franțuzesc. Am înțeles atunci unul din principiile sale; cînd străinii vin în Franța, ei trebuie să vorbească franțuzește.

Cîtiva ani mai tîrziu, planificîndu-mi o excursie în Europa, și avînd invitația lui de Broglie pentru a ține o conferință specială la Institutul „Henry Poincaré“, al cărui direc-

¹ „Aș dori să-l văd pe profesorul de Broglie“.

„Vreți să spuneți, pe domnul Duce de Broglie“

„O.K., pe Ducele de Broglie“. — N.T.

tor era de Broglie, am hotărît să fac față bine pregătit. Am planificat să-mi scriu conferința în franceza mea (încă) săracă pe bordul vaporului cu care urma să străbat Atlanticul, apoi să rog pe cineva la Paris să corecteze textul și să-l folosesc drept note pentru conferință. Dar, după cum fiecare cunoaște, toate hotărârile bune se prăbușesc într-un voiaj peste ocean, care oferă foarte multe distracții și a trebuit să fac față auditoriului de la Sorbona complet nepregătit. Conferința s-a desfășurat oarecum șontic-șontic, dar franceza mea a rezistat și fiecare a înțeles ce am vrut să spun. După conferință, i-am spus lui de Broglie că sint necăjit că n-am putut să-mi îndeplinesc planul inițial, acela de a-mi fi corectat notele scrise în franceză. „Mon dieu,” a exclamat dînsul, „este o fericire că n-ați făcut-o.”

Și de Broglie mi-a povestit despre o conferință ținută de cunoscutul fizician englez R.H.Fowler. Se știe foarte bine că, deoarece engleza este cea mai bună limbă din lume, englezii sint de părere că toți străinii trebuie s-o învețe, în felul acesta dînșii eliberîndu-se de necesitatea de a învăța orice altă limbă. Deoarece conferința de la Sorbona urma să fie ținută în franțuzește, Fowler și-a pregătit un text complet în limba engleză pe care l-a trimis în prealabil lui de Broglie, care l-a tradus personal în franceză. Și astfel Fowler a ținut conferința în limba franceză folosind un text bătut la mașină. De Broglie mi-a povestit că după conferință, un grup de studenți a venit la dînsul și i-au spus: „Monsieur le Professeur, noi sintem tare uimiți. Ne-am așteptat ca profesorul Fowler să țină conferința în engleză, căci noi toți cunoaștem suficient engleza pentru a fi putut să-l înțelegem. El n-a vorbit însă în engleză, ci într-o altă limbă și nu ne putem da seama în ce limbă a vorbit”. „Iată că, adaugă de Broglie, a trebuit să le spun că profesorul Fowler, și-a ținut conferința în franceză!”

ECUAȚIA DE UNDĂ A LUI SCHRÖDINGER

Elaborînd ideea revoluționară că mișcarea particulelor atomice este ghidată de niște unde pilot misterioase, de Broglie nu a reușit să dezvolte o teorie matematică strictă a acestui fenomen și, în anul 1926, cam la un an după publi-

cația lui de Broglie, a apărut un articol al fizicianului austriac, Erwin Schrödinger, care dădea o ecuație generală a undelor lui de Broglie și demonstra validitatea acesteia pentru toate tipurile de mișcare ale electronului. În timp ce modelul lui de Broglie al atomului se aseamăna mai mult cu un instrument de coarde neobișnuit, sau mai degrabă cu un set de inele metalice concentrice oscilante, avind diferite diametre, modelul lui Schrödinger constituia o analogie apropiată cu instrumentele de suflat; în atomii săi, oscilațiile au loc în întreg spațiul care înconjură nucleul atomic.

Să considerăm un disc plat de metal asemănător cu un talger fixat în centru (fig. 21, *a*). Dacă-l lovim, el va începe să oscileze bordura sa, mișcându-se periodic în sus și în jos (fig. 21, *b*). Există de asemenea și alte moduri mai complicate de oscilație (armonice), ca în desenul din fig. 21, *c*, în care centrul talgerului și toate punctele amplasate pe o circumferință (însemnată în figură printr-o linie groasă) sînt în repaus, astfel că atunci cînd materialul din interiorul circumferinței arcuieste în sus, materialul din afară a acesteia coboară, și invers. Punctele și liniile aflate în nemișcare, de pe o suprafață elastică oscilantă, se numesc punctele și liniile *nodale*; fig. 21, *c* poate fi extinsă, desenînd armonice superioare care corespund la două sau mai multe cercuri nodale în jurul punctului central nodal.

În afara acestor oscilații „radiale” există de asemenea „oscilații azimutale”, în care liniile nodale sînt constituite de linii drepte care trec prin centru, așa cum se arată în fig. 21, *d* și *e*, în caresăgețile indică dacă membrana se ridică sau coboară în raport cu poziția orizontală de echilibru. Desigur, în cazul unei membrane date, oscilațiile radiale și azimutale pot avea loc simultan. Starea de mișcare complexă rezultantă poate fi descrisă cu ajutorul a două numere întregi n_r și n_θ care dau numărul liniilor nodale, radiale și azimutale.

În ordinea complexității urmează oscilațiile tridimensionale ca acelea, de exemplu, pentru undele sonore în aerul care umple o sferă de metal rigidă. În cazul acesta, este necesar să introducem un al treilea mod de linii nodale și, corespunzător, un al treilea număr întreg n_l care dă numărul acestora.

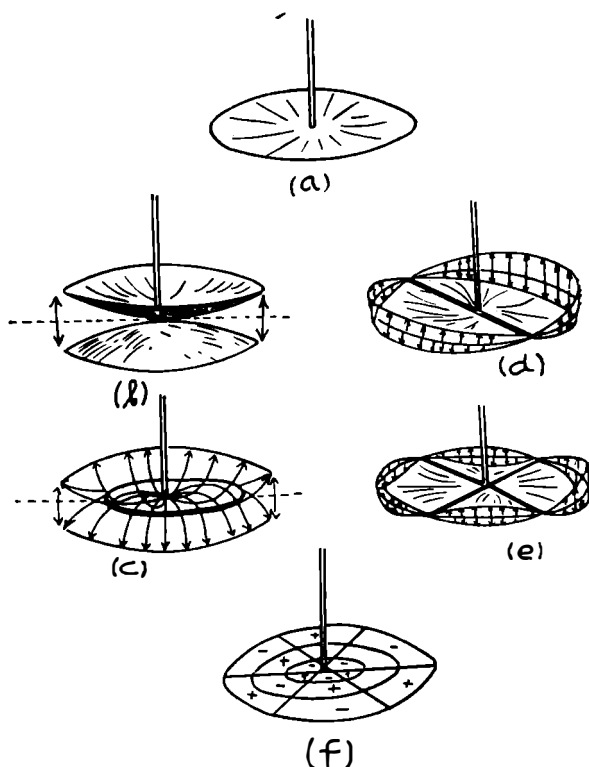


FIG. 21.

Diferite moduri de oscilație a unui disc elastic fixat în centru: a — stare de repaus; b — punct nodal în centru; c — o linie nodală circulară; d — o linie nodală radială; e — două linii nodale radiale; f — trei linii nodale radiale și două circulare.

Acest tip de oscilații a fost studiat cu mulți ani înainte în acustica teoretică și în particular Herman von Helmholtz a făcut, în secolul trecut, o serie de studii sistematice asupra vibrațiilor aerului închis în sfere rigide de metal (rezonatorii lui Helmholtz). El a perforat o mică fantă în sferă pentru a putea introduce din exterior prin ea un sunet, și a utilizat o sireună care emitea un ton pur, a cărui înălțime putea fi modificată continuu, variind viteza de rotație a discului sireunei. Atunci când frecvența sunetului sireunei coincidea

cu una din oscilațiile posibile ale aerului din sferă, se observa rezonanța. Aceste experiențe au fost în perfectă concordanță cu soluțiile matematice ale ecuației de undă pentru sunet, ecuație care este prea complicată pentru a fi discutată în această carte.

Ecuația scrisă de Schrödinger pentru undele de Broglie este foarte asemănătoare cu binecunoscuta ecuație a undelor pentru propagarea sunetului și a luminii (adică a undelor electromagnetice) cu deosebirea că timp de câțiva ani a rămas un mister *ce anume oscila*. La această chestiune vom reveni în capitolul următor.

Atunci când în atomul de hidrogen un electron se mișcă în jurul unui proton, situația este într-o anumită măsură similară cu oscilația unui gaz într-un recipient rigid sferic. Dar, în timp ce în rezonatorii lui Helmholtz gazul este împiedicat de către peretele rigid al sferei să se extindă, electronul atomic este supus atracției electrice a nucleului central, care-i frânează mișcarea atunci când electronul se îndepărtează de centru, și îl oprește când depășește limita permisă de energie sa cinetică. În ambele cazuri situația este arătată grafic în fig. 22. În figura din stînga „groapa de potențial” (adică coborîrea energiei potențiale în vecinătatea unui punct anumit) se aseamănă cu un perete cilindric; în figura din dreapta, se aseamănă mai mult cu o groapă în formă de pilnie săpată în pămînt. Liniile orizontale reprezintă nivelele de energie cuantificată, cea mai joasă din ele corespunzînd energiei celei mai joase pe care o poate poseda particula. Comparînd fig. 22 *b*, cu fig. 12, din capitolul II, vedem că nivelele atomului de hidrogen calculate pe baza ecuației lui Schrödinger sînt identice cu acelea obținute cu ajutorul vechii teorii a lui Bohr a orbitelor cuantificate. Aspectul fizic este însă complet diferit. În loc de a mai avea orbite nete, circulare sau eliptice, de-a lungul cărora călătoresc electroni punctiformi, acum avem un atom plin, reprezentat prin vibrațiile multiforme a ceva care, în primii ani ai mecanicii ondulatorii, a fost numit, în lipsa unui nume mai bun, o funcție ψ (litera greacă *psi*).

Trebuie să menționăm aici că distribuția rectangulară a potențialului arătată în fig. 22 *a* s-a dovedit a fi foarte utilă în descrierea mișcării protonului și neutronului în interiorul nucleului atomic și că, ulterior, a fost utilizată cu suc-

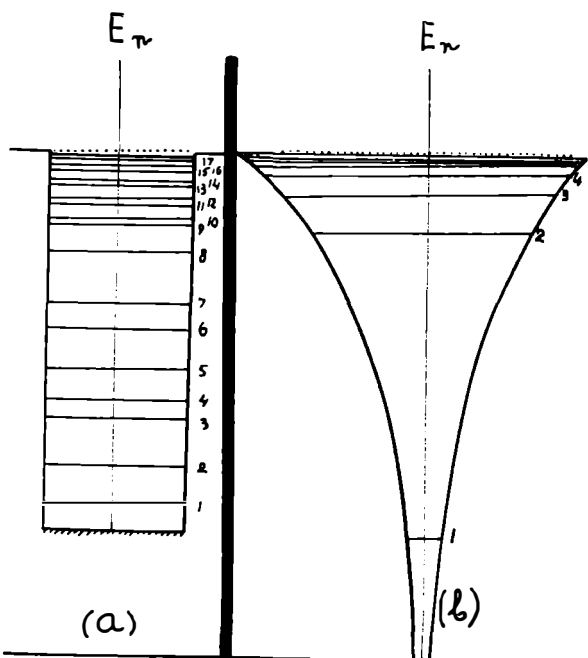


FIG. 22.

Nivelele energetice cuantificate într-o groapă de potențial rectangulară (a) și în cazul unei gropi de potențial în formă de pilnie (b).

ces de Maria Goeppert Mayer, și independent de Hans Jensen, pentru explicarea nivelelor energetice în interiorul nucleelor atomice și a originii spectrelor razelor γ ale diferitelor nuclee radioactive.

Frecvențele diferitelor moduri de oscilație ψ nu corespund frecvențelor undelor luminoase emise de atom, ci valorilor energiilor diferitelor stări cuantice divizate prin h . Astfel, emisia unei linii spectrale necesită excitarea a două moduri de vibrație, fie ψ_m și ψ_n , rezultând frecvența compusă.

$$\nu_{m,n} = \frac{E_m}{h} - \frac{E_n}{h} = \frac{E_m - E_n}{h}$$

care este aceeași cu cea care rezultă din expresia lui Bohr pentru frecvența cuantei de lumină care rezultă din tran-

ziția unui electron atomic de la nivelul de energie E_m , la nivelul de energie mai coborît E_n .

APLICAREA MECANICII ONDULATORII

În afara faptului că dădea o fundamentare mai rațională ideii inițiale a lui Bohr asupra orbitelor cuantificate și că înlătura unele discrepanțe, mecanica ondulatorie s-a dovedit în stare să explice o serie de fenomene care erau mult în afara posibilităților vechii teorii cuantice. Așa cum s-a menționat în capitolul II, autorul cărții de față și, independent, o echipă formată din Ronald Gurney și Edward Condon au utilizat cu succes ecuația de undă a lui Schrödinger pentru explicarea emisiei de particule α de către elementele radioactive, precum și a pătrunderii acestora în nucleeele altor elemente ușoare și a transformărilor de elemente care rezultă. Pentru a înțelege aceste fenomene destul de complicate, vom compara nucleul atomic cu o fortăreață înconjurată din toate părțile de ziduri înalte, în fizica nucleară analogul zidurilor fortăreței este cunoscut ca *barieră de potențial*. Datorită faptului că atât nucleul atomic, cât și particula α poartă o sarcină electrică pozitivă, există o puternică forță de respingere de tip Coulomb, forță care acționează asupra particulei care se apropie de nucleu.² Sub acțiunea acestei forțe o particulă α împușcată în nucleu poate fi oprită și respinsă înainte ca aceasta să intre în contact nemijlocit cu nucleul. Pe de altă parte, particulele α care sînt incluse în diferitele nucleee ca părți constituente ale acestora sînt împiedicate să scape din nucleu de niște foarte puternice forțe nucleare de atracție (analoge forțelor de coeziune din lichidele obișnuite), dar aceste forțe nucleare acționează numai cînd particulele sînt împachetate strîns; fiind în contact direct unele cu altele. Combinația acestor două forțe formează o barieră de potențial care împiedică particulele din interior de a scăpa în afară și pe cele din exterior de a

² În timpul primelor studii asupra fenomenelor electrice, fizicianul francez Charles de Coulomb a stabilit că forțele care acționează între particulele încărcate sînt proporționale cu produsul sarcinilor lor electrice și invers proporționale cu pătratul distanțelor dintre ele. Aceasta este cunoscută ca legea lui Coulomb.

intra înăuntru, pînă cînd energia cinetică a acestora nu este suficient de puternică pentru a le cățăra peste culmea barierei de potențial.

Rutherford a stabilit experimental că particulele α emise de diferitele elemente radioactive, ca de exemplu uraniu și radiu, au energii cinetice cu mult mai mici decît acelea necesare pentru a depăși bariera. Se cunoștea, de asemenea, că atunci cînd se țintește cu particule α cu energii cinetice mai mici decît cele necesare pentru a depăși bariera de potențial ele pătrund totuși, adesea, în nucleele bombardate dinafară, producînd transformări nucleare artificiale. În conformitate cu principiile de bază ale mecanicii clasice, ambele aceste fenomene sînt absolut imposibile, astfel că nici un fel de dezintegrare nucleară spontană avînd drept rezultat emisia de particule α și nici un fel de transformări nucleare artificiale sub influența unui bombardament α nu pot să existe. Și totuși, ambele au fost observate experimental!

Dacă situația este considerată din punctul de vedere al mecanicii ondulatorii, ea apare complet diferită, deoarece mișcarea particulelor este guvernată de undele pilot ale lui de Broglie. Pentru a înțelege modul în care mecanica ondulatorie explică aceste evenimente, imposibile din punct de vedere clasic, trebuie să amintim că mecanica ondulatorie este față de mecanica clasică newtoniană în aceeași relație ca și optica ondulatorie față de vechea optică geometrică. În conformitate cu legea lui Snell, o rază de lumină care cade pe suprafața unei sticle sub un unghi oarecare de incidență i (fig. 23, *a*) suferă o refracție sub un unghi mai mic r , fiind satisfăcută condiția $\sin i / \sin r = n$, unde n este indicele de refracție al sticlei. Dacă inversăm situația (fig. 23, *b*) și îndrumăm o rază de lumină, care se propagă prin sticlă, să iasă în aer, unghiul de refracție va fi mai mare decît cel de incidență și vom avea relația $\sin i / \sin r = 1/n$. În felul acesta, o rază de lumină care cade pe suprafața interioară dintre sticlă și aer, sub un unghi de incidență mai mare decît o anumită valoare critică, nu va mai intra de loc în aer și va fi în întregime reflectată în sticlă. În conformitate cu teoria ondulatorie a luminii, situația se prezintă altfel. Undele de lumină care suferă o reflexie internă totală nu sînt reflectate de granița matematică dintre cele două

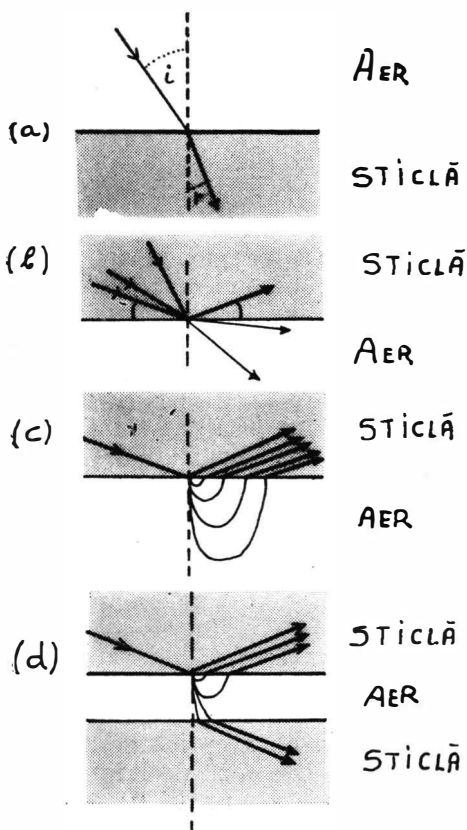
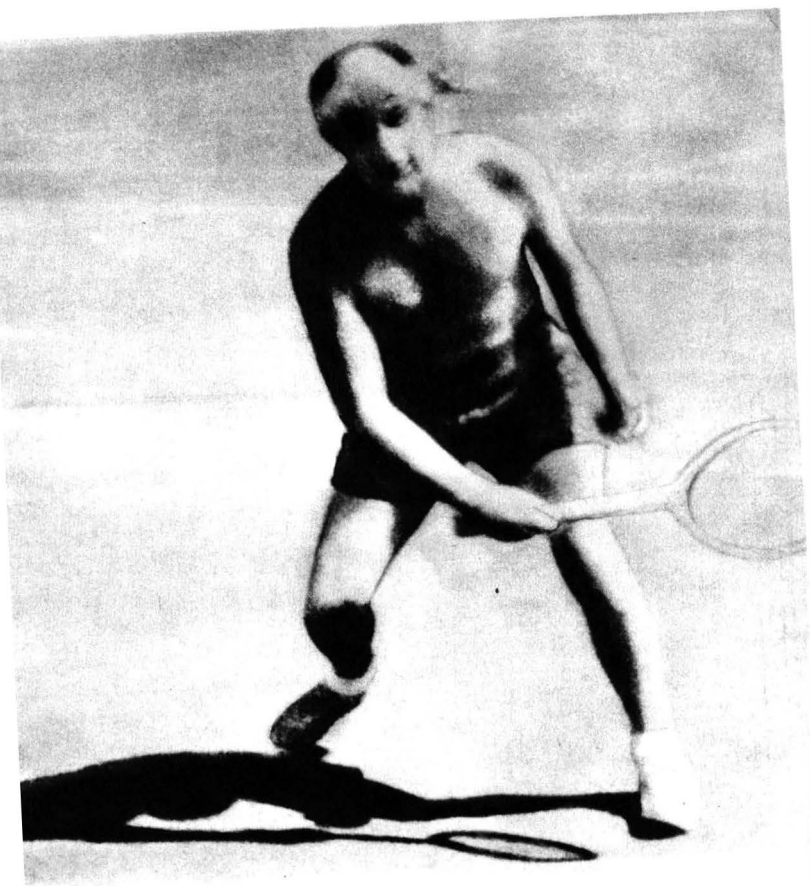


FIG. 23.

Analogia dintre mecanica ondulatorie și optica ondulatorie. În (a) este reprezentat desenul familiar al refracției luminii care trece dintr-un mediu mai puțin dens într-unul mai dens. În (b) avem cazul invers în care lumina trece din mediul mai dens, în cel mai puțin dens și în care poate fi reflectată total pe suprafața de despărțire, dacă unghiul de incidență depășește o anumită valoare critică. În conformitate cu teoria ondulatorie a luminii, reflexia are loc nu pe suprafața matematică care separă cele două medii, ci în interiorul unui oarecare strat cu grosime de câteva lungimi de undă. În felul acesta, dacă al doilea strat din mediul mai dens este amplasat la câteva lungimi de undă distanță de primul strat, o fracțiune a luminii incidente nu va fi reflectată total, ci va intra în stratul al doilea, mai dens, continuând propagarea în direcția inițială. În același mod, în conformitate cu mecanica ondulatorie, unele particule pot străbate prin regiunile interzise de mecanica clasică, regiuni în care potențialul este mai înalt decât energia cinetică inițială a particulelor.



W. Heisenberg jucindu-se la «rece» (fotograf necunoscut)



E. Fermi jucându-se la «cald» (fotografiat de autor)

substanțe, ci pătrund în cel de al doilea mediu (în cazul nostru în aer), pe o adâncime de câteva lungimi de undă λ și pe urmă sînt aruncate înapoi în mediul inițial (fig. 23, c). Ca urmare, dacă vom plasa o a doua placă de sticlă la o distanță de câteva lungimi de undă (în cazul luminii vizibile, la cîțiva microni), o parte oarecare a luminii care intră în aer va atinge suprafața sticlei și, ca urmare, se va propaga în continuare în direcția inițială (fig. 23, d). Teoria acestui fenomen poate fi găsită în cărțile de optică publicate cu un secol în urmă și constituie o demonstrație standard în majoritatea cursurilor universitare de optică.

În mod analog, undele de Broglie, care constituie ghidul mișcării particulelor α și al altor proiectile atomice, pot pătrunde în regiunile din spațiu care sînt interzise pentru particule, în conformitate cu mecanica clasică newtoniană, și în felul acesta particulele α , protonii etc. pot depăși bariere de potențial a căror înălțime este mai mare decît energia particulei incidente. Din punct de vedere fizic însă probabilitatea de pătrundere are importanță numai pentru particule cu masă atomică, și pentru bariere nu mai largi decît 10^{-12} sau 10^{-13} cm. Să considerăm, de exemplu, un nucleu de uraniu care emite o particulă α la un interval de circa 10^{10} ani. O particulă α , prizonieră în interiorul barierei de potențial a uraniului ajunge la zidul barieră cam de 10^{21} ori pe secundă ceea ce înseamnă că șansa de a scăpa după o simplă încercare este una din $10^{10} \times 3 \cdot 10^7 \times 10^{21} \cong 3 \cdot 10^{38}$ lovituri ($3 \cdot 10^7$ este numărul de secunde într-un an). Tot astfel, șansele ca un proiectil atomic să pătrundă în interiorul unui nucleu sînt foarte mici pentru fiecare lovitură individuală, dar pot deveni considerabile dacă sînt implicate un număr foarte mare de coliziuni nucleare. Fritz Houtermans și Robert Atkinson au arătat în anul 1929 că ciocnirile nucleare provocate de mișcarea termică intensivă, cunoscute ca *reacții termonucleare*, constituie cauza producerii de energie în Soare și stele. Fizicienii lucrează acum din greu pentru a realiza așa-numitele „reacții termonucleare controlate” care ar furniza surse de energie nucleară ieftine, inepuizabile și nenocive. Toate acestea nu ar fi fost posibile, dacă mecanica clasică newtoniană nu ar fi fost înlocuită cu mecanica ondulatorie a lui de Broglie-Schrödinger.



W. HEISENBERG ȘI PRINCIPIUL DE NEDETERMINARE

Simultan cu articolul lui Schrödinger asupra mecanicii ondulatorii, care a apărut în revista „Annalen der Physik“, într-o altă revistă germană, „Physikalische Zeitschrift“, a apărut un articol al lui Werner Heisenberg de la Universitatea din Göttingen, consacrat aceluiași subiect și conducând la exact aceleași rezultate. Dar, spre marea uluire a fizicienilor care au citit cele două articole, autorii porneau de la presupuneri fizice complet diferite, foloseau metode matematice în întregime diferite și păreau să nu aibă nimic comun între ele.

Așa cum s-a arătat în capitolul precedent, Schrödinger considera mișcarea electronilor atomici ca fiind guvernată de un sistem de unde de Broglie tridimensionale generalizate care înconjură nucleul atomic și a căror frecvențe și forme de oscilație sînt determinate de cîmpul forțelor electrice și magnetice. Pe de altă parte, Heisenberg lua în considerare un model mai abstract. El trata atomul ca și cum acesta ar fi compus dintr-un număr infinit de oscilatori liniari „virtuali“, ale căror frecvențe coincideau cu toate frecvențele posibile pe care atomul în chestiune putea să-l emită. Astfel, în timp ce în tabloul lui Schrödinger emisia unei linii spectrale de

frecvență $\nu_{m,n}$ era considerată ca „un rezultat al cooperării“ a două funcții oscilatorii¹ ψ_m și ψ_n , în modelul lui Heisenberg aceeași linie spectrală era emisă de un oscilator individual pe care îl putem denumi $V_{m,n}$.

În mecanica clasică, un oscilator liniar este caracterizat prin două numere: deplasarea de la poziția de echilibru q și viteza lui, v , ambele cantități variind periodic în timp. Se obișnuiește în mecanica superioară să se folosească în locul vitezei v impulsul² p , definit ca produsul dintre masa particulei și viteza acesteia ($p = mv$). Pentru o lege dată a forței, care acționează asupra oscilatorului, acesta posedă o frecvență ν , bine definită. Spectrul optic însă posedă o dublă mulțime de frecvențe, care poate fi reprezentată printr-un tabel:

$V_{m,n}$	ν_{11}	ν_{12}	ν_{13}	ν_{14}	ν_{15}	ν_{16}	etc.
	ν_{21}	ν_{22}	ν_{23}	ν_{24}	ν_{25}	ν_{26}	etc.
	ν_{31}	ν_{32}	ν_{33}	ν_{34}	ν_{35}	ν_{36}	etc.
	ν_{41}	ν_{42}	ν_{43}	ν_{44}	ν_{45}	ν_{46}	etc.
	etc.	etc.	etc.	etc.	etc.	etc.	etc.

Rețele de numere de această formă erau cunoscute de mult de matematicieni, ca *matrice*, și au fost folosite cu mult succes pentru rezolvarea diferitelor probleme algebrice.

¹ Pentru simplitate, noi folosim aici un singur număr cuantic în loc de trei pentru a caracteriza fiecare mod de oscilație.

² Noțiunea de *impuls*, pe care Isaac Newton îl numea *cantitate de mișcare*, a fost introdusă în cartea sa *Principiile matematice ale filozofiei naturale* și a rezultat din combinarea legii a doua și a treia de mișcare. Dacă două particule, aflate inițial în repaus, interacționează între ele, forțele de acționare F_1 și F_2 sînt numeric egale și dirijate în direcții opuse. Pe de altă parte, vitezele cîștigate în perioada de interacțiune (v_1 și v_2) sînt invers proporționale cu masele (m_1 și m_2) celor două particule. Astfel, „cantitățile de mișcare“ (sau impulsurile, cum le numim astăzi) sînt egale numeric și opuse ca direcție. Aceasta constituie vestita *Lege a conservării impulsului*.

Matricele pot fi *finite* dacă indicii m și n parcurg toate numerele întregi cuprinse între 1 și un număr dat, sau *infinite*, dacă și m și n parcurg tot șirul natural al numerelor, până la infinit. A fost dezvoltată o ramură specială a matematicilor, în care fiecare matrice dată (finită sau infinită) poate fi reprezentată printr-un singur simbol, tipărit cu aldine. Astfel, **a** semnifică matricea:

a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{16}	a_{17}	etc.
a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}	a_{25}	a_{26}	a_{27}	etc.
a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{34}	a_{35}	a_{36}	a_{37}	etc.
etc.	etc.	etc.	etc.	etc.	etc.	etc.	etc.

Întocmai ca numerele obișnuite, matricile pot fi adunate, scăzute, înmulțite și împărțite între ele. Regulile de adunare și scădere sînt similare cu acelea ale numerelor obișnuite: se adună sau se scad termen cu termen. De exemplu:

a ± b	=	$a_{11} \pm b_{11}$	$a_{12} \pm b_{12}$	$a_{13} \pm b_{13}$	etc.
		$a_{21} \pm b_{21}$	$a_{22} \pm b_{22}$	$a_{23} \pm b_{23}$	etc.
		$a_{31} \pm b_{31}$	$a_{32} \pm b_{32}$	$a_{33} \pm b_{33}$	etc.
		etc.	etc.	etc.	etc.

Din această definiție rezultă că adunarea matricelor respectă legea de comutativitate; adică, $\mathbf{a} + \mathbf{b} = \mathbf{b} + \mathbf{a}$, la fel cum $3 + 7 = 7 + 3$, sau $a + b = b + a$. Legile de multiplicare și împărțire a matricelor sînt însă mai complicate. Pentru a obține termenul din linia m și coloana n a produsului $\mathbf{ab}$, trebuie să multiplicăm termen cu termen tot șirul de termeni din linia m a lui **a**, prin tot șirul de termeni din coloana a n -a a lui **b** și să adunăm toate aceste produse între ele. Schematic, această regulă poate fi reprezentată prin diagramele de mai jos, în care punctul din produs

înconjurat de un cerc este dat de suma produselor punctelor plasate în pătrate:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{|c|} \hline 1^a \\ \hline \end{array} \\
 \begin{array}{|c|} \hline 2^a \\ \hline \end{array} \\
 \begin{array}{|c|} \hline 3^a \\ \hline \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{|c|c|c|} \hline \cdot & \cdot & \cdot \\ \hline \cdot & \cdot & \cdot \\ \hline \cdot & \cdot & \cdot \\ \hline \end{array}
 \times
 \begin{array}{|c|c|c|} \hline \cdot & \cdot & \cdot \\ \hline \cdot & \cdot & \cdot \\ \hline \cdot & \cdot & \cdot \\ \hline \end{array}
 =
 \begin{array}{|c|c|c|} \hline \cdot & \cdot & \cdot \\ \hline \odot & \cdot & \cdot \\ \hline \cdot & \cdot & \cdot \\ \hline \end{array}$$

1^a 2^a 3^a
Coloane

sau:

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline \cdot & \cdot & \cdot \\ \hline \cdot & \cdot & \cdot \\ \hline \cdot & \cdot & \cdot \\ \hline \end{array}
 \times
 \begin{array}{|c|c|c|} \hline \cdot & \cdot & \cdot \\ \hline \cdot & \cdot & \cdot \\ \hline \cdot & \cdot & \cdot \\ \hline \end{array}
 =
 \begin{array}{|c|c|c|} \hline \cdot & \cdot & \cdot \\ \hline \cdot & \cdot & \cdot \\ \hline \cdot & \cdot & \odot \\ \hline \end{array}$$

Pentru a ne familiariza mai bine cu acest procedeu, vom folosi ca elemente ale matricelor numere în loc de litere și vom calcula produsul a două matrice:

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 3 & 5 \\ \hline 2 & 5 & 1 \\ \hline 4 & 3 & 2 \\ \hline \end{array}
 \times
 \begin{array}{|c|c|c|} \hline 3 & 5 & 4 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 2 & 3 & 5 \\ \hline \end{array}
 \text{ obținem }
 \begin{array}{|c|c|c|} \hline 16 & 23 & 32 \\ \hline 13 & 18 & 18 \\ \hline 19 & 29 & 29 \\ \hline \end{array}$$

deoarece $1 \times 3 + 3 \times 1 + 5 \times 2 = 16$; $1 \times 5 + 3 \times 1 + 5 \times 3 = 23$; etc.

Să inversăm acum ordinea factorilor și să calculăm:

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline 3 & 5 & 4 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 2 & 3 & 5 \\ \hline \end{array}
 \times
 \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 3 & 5 \\ \hline 2 & 5 & 1 \\ \hline 4 & 3 & 2 \\ \hline \end{array}
 \text{ obținem }
 \begin{array}{|c|c|c|} \hline 29 & 46 & 28 \\ \hline 7 & 11 & 8 \\ \hline 28 & 36 & 23 \\ \hline \end{array}$$

Rezultatul este cu totul altul decât în primul caz! *Legea comutativității înmulțirii, atât de obișnuită în aritmetică și în algebra obișnuită, nu mai este valabilă în calculul matricial!*

Acesta este motivul pentru care calculul matricial se numește *algebră necomutativă*. Trebuie să menționăm aici că nu toate perechile de matrice dau în mod necesar rezultate diferite când se inversează ordinea factorilor. Dacă rezultatul este același, se spune că cele două matrice *comută*; dacă rezultatul este diferit, ele *nu comută*.

Împărțirea matricelor se definește în același mod ca și în algebra obișnuită, unde $\frac{a}{b} = a \cdot \frac{1}{b}$, iar valoarea lui $\frac{1}{b}$ (inversul acestui număr) respectă condiția $b \cdot \frac{1}{b} = 1$. În algebra necomutativă $\frac{a}{b} = a \cdot \frac{1}{b}$ unde $\frac{1}{b}$ îndeplinește condiția $b \cdot \frac{1}{b} = 1$ și

$$1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \text{etc.} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \text{etc.} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \text{etc.} \\ \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} \end{vmatrix}$$

Ideea lui Heisenberg a fost că deoarece frecvențele liniilor spectrale emise de un atom constituie o matrice infinită

$$v_{m,n} = \begin{vmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} & v_{14} & \text{etc.} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} & v_{24} & \text{etc.} \\ v_{31} & v_{32} & v_{33} & v_{34} & \text{etc.} \\ \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} \end{vmatrix}$$

atunci și cantitățile mecanice ca vitezele, impulsurile etc. pot să fie scrise în forma de matrice. Astfel, impulsurile și coordonatele urmează a fi date de matricele

$$p = \begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & \text{etc.} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & \text{etc.} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} & \text{etc.} \\ \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} \end{vmatrix}$$

și

$$q = \begin{array}{ccccc} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} & \text{etc.} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} & \text{etc.} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} & \text{etc.} \\ \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} \end{array}$$

în care valorile individuale p_{mn} și q_{mn} oscilează cu frecvențele ν_{mn} date în matricea de mai sus.

Înlocuind pe p și q în ecuațiile mecanicii clasice, Heisenberg spera să obțină frecvențele individuale și amplitudinile diferiților oscilatori „virtuali”. A fost totuși necesar încă un pas pentru a obține rezultatul final. În mecanica clasică p și q sînt numere obișnuite și prin urmare nu există nici o diferență în calcule cînd se scrie pq sau qp . Matricile p și q nu comută ($pq \neq qp$) astfel că trebuie introdus un postulat suplimentar pentru a stabili ce anume este diferența dintre pq și qp . Heisenberg a stabilit că această diferență, care este de asemenea o matrice, este egală cu matricea unitate I înmulțită cu un coeficient numeric obișnuit pe care l-a ales $h/2\pi i$. Astfel, condiția suplimentară se scrie:

$$pq - qp = \frac{h}{2\pi i} I.$$

Adăugînd această condiție la ecuațiile clasice ale mecanicii, scrise în formă matricială, el a obținut un sistem de ecuații care dădeau valorile corecte ale frecvențelor și ale intensităților relative ale liniilor spectrale, identice cu rezultatele obținute de Schrödinger care folosisese ecuația sa de undă.

Identitatea neașteptată a rezultatelor obținute de mecanica ondulatorie a lui Schrödinger și de mecanica matricială a lui Heisenberg, care păreau să nu aibă nimic comun atît în premisele fizice cit și în tratarea matematică, a fost explicată de Schrödinger în unul din articolele sale următoare. El a reușit să demonstreze că, oricît ar părea de necrezut la prima vedere, mecanica sa ondulatorie este identică cu mecanica matricială a lui Heisenberg și că, în fapt, una poate fi dedusă din alta. Era tot atît de surprinzător ca

și cum ai fi afirmat că balenele și delfinii nu sînt pești ca rechinii și heringii, ci animale asemănătoare cu elefanții și caii! Faptul este însă fapt și astăzi se utilizează mecanica ondulatorie-matricială alternativ, depinzînd de gust și comoditate. În particular, în calculele intensităților de radiație se utilizează elemente de matrice calculate pe baza mecanicii ondulatorii.

RENUNȚAREA LA TRAIECTORIILE LINIARE CLASICE

În pofida faptului însă că noua teorie cuantică, fie în formă ondulatorie, fie în cea matricială, dădea o descriere matematică perfectă a fenomenelor atomice, ea nu reușea să facă lumină în tabloul fizic. Cesemnificație fizică urma să fie dată acestor unde misterioase, acestor matrice derutante? În ce raport se găsesc ele cu noțiunile noastre bazate pe bun simț asupra materiei și lumii în care trăim? Răspunsul la această întrebare l-a dat Heisenberg într-un articol publicat în anul 1927. Heisenberg își începe discuția cu o referință la teoria relativității a lui Einstein, care în momentul publicării sale (și în unele cazuri și astăzi) a fost considerată de mulți fizicieni eminenți ca fiind în contradicție cu bunul simț. Ce este „bunul simț”? Vestitul filozof german, Immanuel Kant (despre ale cărui lucrări autorul are doar o slabă cunoștință) ar defini acest concept probabil în felul următor: „Bunul-simț? Mda, bunul simț este modul în care lucrurile par că trebuie să fie”. Și apoi, dacă ar fi întrebat: „Ce înseamnă modul în care lucrurile par că trebuie să fie”? El ar putea să răspundă: „Ei, înseamnă așa cum ele au fost întotdeauna”².

Einstein a fost, probabil, primul care a înțeles faptul important că noțiunile de bază și legile naturii, cu toate că sînt bine stabilite, sînt valabile numai în cadrul limitelor observației și nu trebuie să fie în mod necesar adevărate, în continuare, și dincolo de aceste limite. Pentru popoarele de cultură antică, Pămîntul era plan, dar cu siguranță că el nu a fost așa pentru Magellan, nici pentru cosmonauții

² Această conversație imaginară se află în exclusivitate în mintea autorului și nu poate fi atribuită lui Immanuel Kant.

moderni. Noțiunile fizice de bază, de spațiu, timp și **mișcare** erau bine stabilite și supuse bunului simț pînă cînd **știința** a depășit limitele care mărgineau pe oamenii de **știință din** trecut. În acel moment a apărut o puternică contradicție, în esență datorată experiențelor lui Michelson relative la viteza luminii, contradicție care l-a forțat pe Einstein să părăsească ideile vechi ale „bunului simț” asupra **evaluării** timpului, măsurării distanței și asupra **mecanicii și l-au** condus la formularea teoriei „de non-bun simț” a **relativității**. A rezultat că pentru viteze foarte mari, pentru distanțe **foarte** mari și pentru intervale de timp foarte mari lucrurile nu sînt „cum ar fi trebuit să fie”.

Heisenberg considera că o situație asemănătoare s-a creat în domeniul teoriei cuantice și el a purces să stabilească care anume lucruri din mecanica clasică a particulelor materiale nu mai sînt valabile atunci cînd se trece în domeniul fenomenelor atomice. În același mod în care Einstein a pornit la analiza critică a inconsistenței fizicii clasice, în domeniul relativistic, prin criticarea unor noțiuni de bază ca *simultaneitatea* a două evenimente aflate la o distanță dată, Heisenberg a atacat noțiunea de bază a mecanicii clasice, aceea de *traietorie* a unui corp material aflat în mișcare. Din timpuri imemorabile traectoria a fost definită ca drumul parcurs de un corp care se mișcă în spațiu. În cazul limită folosit în calculele matematice, „corpul” era un punct matematic (care nu are dimensiuni, după cum l-a definit Euclid) în timp ce „drumul” era o linie matematică (care nu are grosime, potrivit aceluiași autor). Nimeni nu se îndoia că acest caz limită constituie descrierea cea mai bună posibilă a mișcării și că micșorînd erorile experimentale asupra stabilirii coordonatelor și vitezei particulei în mișcare, noi ne-am putea apropia din ce în ce mai mult de descrierea exactă a mișcării.

Heisenberg a ridicat obiecții. El sublinia că în timp ce această afirmație ar fi fără îndoială adevărată dacă lumea ar fi guvernată de legile fizice clasice, existența fenomenelor cuantice poate să răstoarne situația. Să examinăm **întîi** o experiență ideală în cadrul căreia se încearcă să se determine traectoria unei particule cu masă, să zicem în **cîmpul** gravitațional al Pămîntului. Pentru aceasta construim o cameră și evacuăm aerul din ea, pînă cînd în interior nu mai

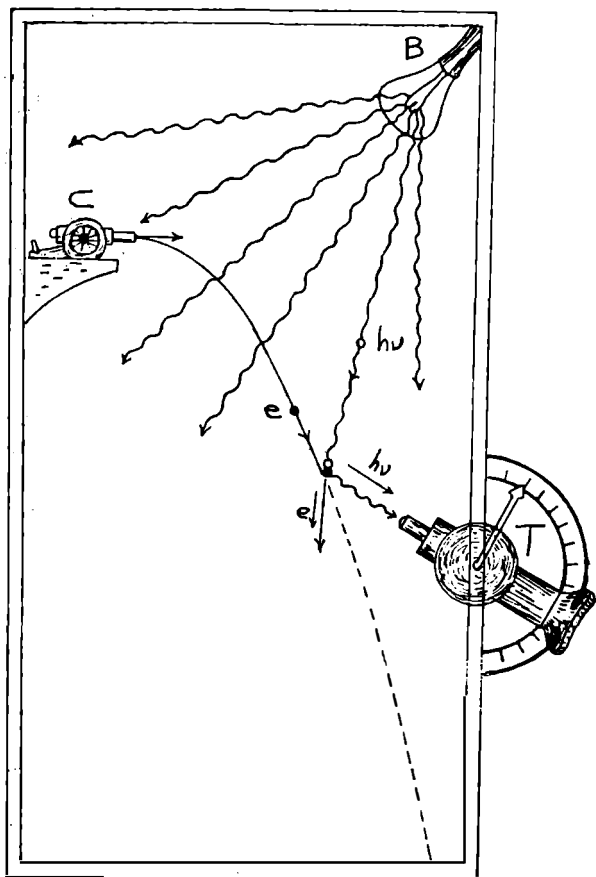


FIG. 24

Microscopul cuantic ideal al lui Heisenberg pentru interpretarea relațiilor de nedeterminare: $\Delta p \Delta q \geq h$.

rămâne nici o singură moleculă (fig. 24). Pe pereții acestei camere instalăm un mic tun, C , care împușcă un obuz de masă m și viteză v , să zicem în direcție orizontală. Pe pereții opus al camerei este amplasat un mic teodolit, T , care poate fi îndreptat asupra particulei în cădere, urmărindu-i drumul. Camera este iluminată de o lampă electrică, B , din

plafon. Lumina becului este reflectată de particula în cădere și intră în tubul teodolitului, poziția particulei fiind indicată fie pe retina ochiului observatorului, fie pe o placă fotografică.

Deoarece experiența pe care o facem este una ideală, trebuie să luăm în considerare toate efectele posibile care pot perturba mișcarea particulei și într-adevăr noi găsim unul, chiar dacă tot aerul a fost evacuat. Atunci când lumina becului este reflectată în tubul teodolitului, ea exercită asupra particulei o anumită presiune, care va determina o deviere a particulei de la traiectoria sa așteptată, parabolică. Poate fi făcută această perturbare neglijabil de mică, infinit de mică?

Să procedăm pas cu pas și să estimăm la început doar zece poziții ale particulei; aprindem becul numai de zece ori în timpul căderii și în felul acesta eliminăm efectul presiunii luminii în timpul când particula nu este observată. Să presupunem că la prima încercare efectul celor zece șocuri provocate de lumina reflectată deviază particula prea departe de traiectoria așteptată. Găsim atunci un remediu foarte ușor. Reducem intensitatea luminii cu factorul necesar deoarece în fizica clasică nu există o limită inferioară pentru cantitatea de energie radiată care poate fi emisă într-o aprindere, precum și vreo limită a sensibilității receptorului luminii reflectate. Reducând intensitatea, putem deci să micșorăm perturbarea totală în timpul zborului particulei, pînă la o valoare mai mică decît a oricărui număr ϵ , oricît de mic am dori să-l alegem. Dacă decidem apoi să mărim numărul pozițiilor observate de zece ori, pentru o definiție mai precisă a traiectoriei, va trebui să aprindem becul de o sută de ori pe timpul zborului. Efectul presiunii radiației de-a lungul întregului zbor va crește în mod corespunzător și perturbarea totală poate deveni mai mare decît ϵ . Pentru a face față situației, vom utiliza un bec de zece ori mai slab și un receptor de zece ori mai sensibil. Următorii pași ne vor obliga să facem o mie, zece mii, o sută de mii etc. observații, folosind în mod corespunzător becuri mai slabe și detectori mai sensibili. La limită, vom obține un număr infinit de observații, fără a perturba traiectoria cu mai mult decît ϵ . Trebuie luat în considerare și un alt aspect. Indiferent cît de mic ar putea să fie punctul în mișcare, imaginea sa optică pe ecran nu

poate fi, datorită fenomenelor de difracție, mai mică decât lungimea de undă λ a luminii folosite. Acest impediment poate fi la rindul său remediat, micșorând λ și folosind în locul luminii vizibile, lumină ultravioletă, raze X și raze γ din ce în ce mai dure. Deoarece în fizica clasică nu există o limită inferioară pentru lungimea undelor electromagnetice, diametrul fiecărei imagini de difracție poate fi făcut, pe calea aceasta, oricât de mic îl dorim. Procedând în felul acesta, putem observa un drum oricât de fin dorim, fără a perturba mișcarea totală cu mai mult de ϵ . Iată cum în cadrul fizicii clasice putem construi conceptual noțiunea de traiectorie ca linie, în sensul euclidian al cuvântului.

Are însă acest mod euclidian vreo corespondență cu realitatea? Nu, răspunde Heisenberg. El susține că acest mod de a proceda în experiența noastră ideală devine imposibil, datorită existenței cuantelor de lumină. Într-adevăr, cea mai mică cantitate de energie purtată de o „străfulgerare de lumină” este egală cu $h\nu$, care corespunde unui impuls mecanic $h\nu/c$. În reflectarea străfulgerării către teodolit, o parte din acest impuls va fi comunicată particulei, modificând momentul acesteia cu:

$$\Delta p \cong \frac{h\nu}{c}$$

În felul acesta, creșterea numărului de observații determină creșterea perturbării traiectoriei dincolo de orice limită, și particula, în loc de a se mișca de-a lungul unei parabole, va executa o mișcare browniană, fiind aruncată înapoi și încolo în toate direcțiile prin cameră. Singura cale de a micșora perturbarea este micșorarea lui ν , care, datorită relației $\nu = c/\lambda$, semnifică mărirea lungimii de undă pînă cînd aceasta capătă dimensiunea camerei. Atunci, în loc de a vedea mici scînteii care să sară ici-colo pe întreaga suprafață a ecranului, vom observa un sistem de spoturi de difracție mari, suprapuse, care vor acoperi întreg ecranul. Astfel că, prin această metodă, nu putem obține nimic care să se asemene cu linii matematice.

Singura alternativă posibilă este să căutăm un compromis. Va trebui să folosim fotoni cu o frecvență care să nu fie prea înaltă și cu o lungime de undă care să nu fie prea mare.

Deoarece indeterminarea Δq în stabilirea de către noi a poziției particulei este $\cong \lambda = c/v$, vom obține:

$$\Delta p \cong \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

sau

$$\Delta p \Delta q \cong h$$

care³ constituie faimoasa relație de indeterminare a lui Heisenberg. Exprimată în viteze, această relație devine:

$$\Delta v \Delta q \cong \frac{h}{m}$$

care arată că devierile de la mecanica clasică devin importante numai în cazul maselor foarte mici. Pentru o particulă de 1 mg obținem:

$$\Delta v \Delta q = \frac{10^{-27}}{10^{-3}} = 10^{-24}$$

care poate fi satisfăcută, de exemplu, luind:

$$\Delta v = 10^{-12} \frac{\text{cm}}{\text{sec}}; \Delta q = 10^{-12} \text{ cm}$$

Astfel, potrivit acestei relații, viteza unei alice mici este imprecisă cu 0,3 metri/secol și imprecizia poziției sale este comparabilă cu diametrul nucleului atomic. Evident, nimeni nu se va sinchisi de asemenea incertitudinii! Pe de altă parte, pentru un electron cu masă de 10^{-27} g, avem

$$\Delta v \Delta q \cong \frac{10^{-27}}{10^{-27}} \cong 1$$

Deoarece afirmația că electronul este în interiorul atomului semnifică faptul că $\Delta q \cong 10^{-8}$ cm, rezultă că incertitudinea vitezei sale este

$$\Delta v = \frac{1}{10^{-8}} = 10^8 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$$

³ Această relație se prezintă adesea cu semnul $\cong$, semnificând „aproximativ egal cu”, sau $\sim$ semnificând „de ordinul de mărime al”, sau ca în fig. 24, cu $\geq$, semnificând „mai mare sau egal cu”.

Incertitudinea asupra energiei cinetice care corespunde la această incertitudine asupra vitezei este

$$\Delta K \cong mv\Delta v = 10^{-27} \cdot 10^{-8} \cdot 10^{-8} \cong 10^{-11} \text{ erg} \cong 10 \text{ e.v.}$$

energie care este comparabilă cu energia totală de legătură a unui electron în atom. Este evident că în astfel de împrejurări este lipsit de sens să se deseneze orbitele electronilor în atom de-a lungul unor linii, deoarece lăţimile acestor linii vor fi comparabile cu diametrele orbitelor cuantice ale lui Bohr!

S-ar putea obiecta că traiectoria unei particule poate fi observată printr-o altă metodă decât cea optică, care conduce la dificultăţile descrise, uzând nişte dispozitive mecanice de un tip oarecare, distribuite prin spaţiu şi să se înregistreze trecerea particulelor pe lângă ele, poate nişte „clopoţei“ care să înceapă să sune când sînt lovite de particulele în trecere. Perturbarea apare însă din nou şi aici. Să presupunem că dispozitivul de înregistrare este constituit dintr-o particulă care se poate mişca într-un recipient de rază l . Această particulă, fiind cuantificată, posedă un şir de stări cuantice ale căror impulsuri se deosebesc prin cantităţile

$$\Delta p \cong \frac{h}{l}$$

astfel că dacă şocul particulei incidente provoacă mutarea dispozitivului de pe o stare cuantică pe alta, particula incidentă pierde o parte substanţială a impulsului său. Însă l este incertitudinea Δq în poziţia particulei incidente, deoarece ea poate să lovească dispozitivul de înregistrare în orice punct al suprafeţei acestuia. În felul acesta, obţinem şi aici din nou

$$\Delta p \Delta q \cong h$$

şi în cazul măsurărilor făcute cu metode mecanice. Menţionăm aici că această metodă a clopoţeilor este foarte larg utilizată în fizica nucleară experimentală, sub numele de camera cu ceaţă, în care atomii ionizaţi ai gazului (cu vapori de apă condensaţi asupra lor) formează lungi urme care indică mişcarea diferitelor particule atomice. Însă urmele camerelor cu ceaţă nu sînt linii matematice şi sînt în realitate mult mai groase decât ar permite-o relaţia de incertitudine.

Deoarece în fizica atomică și nucleară noțiunea de traiectorii liniare clasice nu mai corespunde, apare inevitabil necesitatea elaborării unei alte metode pentru a descrie mișcarea particulelor materiale și aici ne vin în ajutor funcțiile ψ . Ele nu reprezintă nici o realitate fizică. Spre deosebire de undele electromagnetice, undele de Broglie nu posedă masă și prin urmare dacă, în principiu, se poate cumpăra o jumătate de kilogram de lumină roșie, nu există în lume nici măcar un gram de unde de Broglie. Ele nu sînt mai materiale decît traiectoriile liniare ale mecanicii clasice și de fapt pot fi descrise ca „linii matematice lățite“. Ele ghidează mișcarea particulelor în cadrul mecanicii cuantice în același sens în care în cadrul mecanicii clasice traiectoriile liniare ghidează mișcarea particulelor. Dar, exact în același fel în care noi nu putem considera orbitele planetare din sistemul solar ca un fel de linii ferate care forțează planetele Venus, Marte și Pămîntul nostru să se miște de-a lungul unor orbite eliptice, noi nu putem considera nici funcțiile continue ale mecanicii ondulatorii ca un fel de cîmp de forțe care influențează mișcarea electronilor. Funcțiile de undă de Broglie-Schrödinger (sau mai degrabă pătratul valorilor lor absolute, adică $|\psi|^2$) determină *probabilitatea* ca particula să se găsească într-o parte sau alta a spațiului și că se va mișca cu o viteză sau alta.

Nu putem termina acest capitol fără a reda o discuție aprinsă între Niels Bohr, care a fost marele promotor al relațiilor de incertitudine, și Albert Einstein, care a rămas pînă la moartea sa un convins adversar al acestora. Această discuție a avut loc la Bruxelles, la al VI-lea Congres Solvay (1930), care a fost dedicat problemelor teoriei cuantelor și care implica (după cum se putea aștepta, datorită prezenței lui Einstein!) relația de indeterminare în *patru* coordonate.

Pînă acum, în această carte noi am scris relația $\Delta p \Delta q \cong h$ pentru fiecare coordonată luată în parte, ca și pentru impulsul corespunzător. Într-un sistem de coordonate cartezian tridimensional avem însă totdeauna trei relații independente:

$$\Delta p_x \Delta x \cong h$$

$$\Delta p_y \Delta y \cong h$$

$$\Delta p_z \Delta z \cong h$$

Deoarece în teoria relativității *timpul* (în forma⁴ ct) este considerat ca a patra coordonată, iar *energia* (în forma E/c) ca a patra componentă a impulsului, ne putem aștepta să existe o a patra relație de incertitudine și anume

$$\Delta E \Delta t \cong h$$

și tocmai această temă a provocat incidentul de la Congres.

Einstein s-a ridicat și a anunțat că el poate propune o experiență ideală care infirmă această a patra relație. El s-a gândit la o cutie îmbrăcată cu oglinzi ideale (asemănătoare cu cutia lui Jeans, despre care s-a vorbit în capitolul I) și umplută cu o cantitate oarecare de energie radiantă. Într-unul din pereți este amplasat un obturator fotografic idealizat, conectat cu un ceas de alarmă, de asemenea idealizat, care să fie astfel aranjat, încît să comande obturatorul la orice timp dorit, începînd din momentul umplerii cutiei cu radiație (fig. 25). Deoarece ceasul este în interiorul cutiei, iar obturatorul închis, interiorul cutiei este în completă izolare față de lumea exterioară. Einstein a propus să se cîntărească cutia înaintea acțiunii ceasului de alarmă; dacă se acordă un timp suficient, cîntărirea poate fi făcută cu orice precizie dorită. Obturatorul se va deschide exact în momentul în care este prevăzut să acționeze ceasul de alarmă și, ca urmare, o anumită cantitate de energie radiantă E va fi pierdută în afară. După ce obturatorul se închide din nou, cutia poate fi cîntărită din nou, cu orice precizie dorită. Modificarea masei cutiei $M_2 - M_1$ poate fi obținută cu orice precizie dorită, din cele două măsurători, și, înmulțind-o apoi cu c^2 , ea va da cantitatea exactă a energiei emise, astfel că $\Delta E = 0$. Pe de altă parte, ceasul ideal va acționa perfect, încît nu vom avea nici o indeterminare asupra timpului la care a fost emisă energia, astfel că și $\Delta t = 0$. Avînd $\Delta E = 0$ simultan cu $\Delta t = 0$, a patra relație de indeterminare este ucisă.

Argumentarea apăsărea ca foarte convingătoare și Bohr nu a avut nimic de spus. În dimineața următoare însă, după o noapte aproape fără somn, Bohr, cu o față care radia, a apărut în sala de conferință cu explicația. Pentru a cîntări cutia, sub-

⁴ În care $c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/s este viteza luminii în vid.

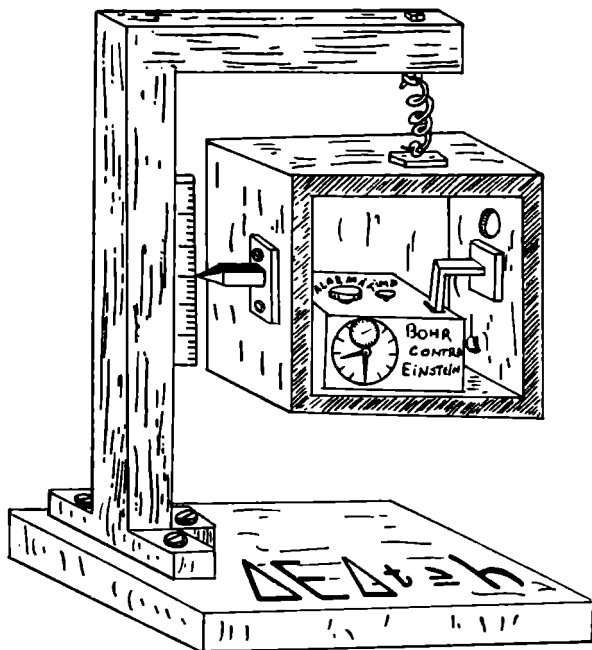
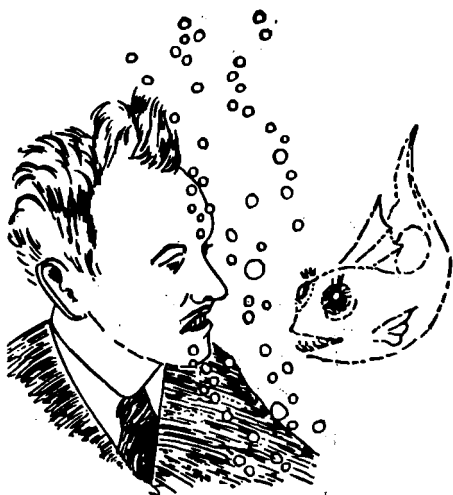


FIG. 25

Experiența ideală a lui Bohr, care infirmă teza lui Einstein cum că relația $\Delta E \Delta t \cong h$ ar fi falsă.

linia ei, va trebui să permitem ca aceasta să se miște pe direcția verticală, indiferent dacă se folosește o balanță sau un cântar cu arc. Ceasul, modificându-și poziția în cimpul gravific al pământului, va pierde sau va câștiga timp în conformitate cu legea lui Einstein referitoare la influența potențialului gravific asupra perioadei ceasului. Drept urmare, va fi provocată o incertitudine Δt asupra momentului acționării obturatorului. Pe de altă parte, amplitudinea oscilațiilor verticale ale cutiei, care determină pe Δt , este legată de modificarea masei care, datorită pierderii de energie, provoacă oscilațiile cutiei, prin relația obișnuită $\Delta p_z \Delta z \cong h$. Cuplind ecuațiile, Bohr ajungea cu ușurință la concluzia că $\Delta E \Delta t \cong h$, respingînd în felul acesta argumentul lui Einstein, folosind în acest scop una din cele mai importante descoperiri ale lui Einstein însuși.

Capitolul de față s-a ocupat în principal de principiul lui Heisenberg și nu de trăsăturile personale ale acestuia. Autorul poate însă adăuga că Heisenberg a fost un schior aproape profesionist, juca ping-pong cu mîna stîngă și, în pofida marelui lui faime ca fizician, era cunoscut la Leipzig (unde lucra ca profesor) ca un pianist de mîna întîi.



P.A.M. DIRAC ȘI ĂNTIPARTICULELE

Teoria relativității și teoria cuantelor, care au apărut aproape simultan la începutul secolului actual, au constituit două mari explozii ale minții umane și au zguduit bazele înseși ale fizicii clasice: relativitatea, în cazul vitezelor apropiate de viteza luminii; cuanta, în cazul mișcărilor restrinse la dimensiuni foarte mici (atomice). Dar, de-a lungul aproape a trei decenii, aceste două mari teorii au rămas mai mult sau mai puțin izolate. Teoria inițială a lui Bohr asupra orbitelor cuantificate, ca și ecuația undelor, a lui Schrödinger, prin care a fost ulterior dezvoltată au fost esențialmente nerelativiste; amindouă erau aplicabile numai particulelor care se mișcau cu viteză mică în raport cu cea a luminii. Vitezele electronilor în interiorul atomului nu sînt însă așa de mici. De exemplu, electronul de pe prima orbită a hidrogenului are o viteză, calculată pe baza teoriei lui Bohr, de $2,2 \times 10^8$ cm/s, care este mai mică decît viteza luminii doar cu ceva mai puțin de 1%. Viteza electronilor din interiorul atomilor mai grei este considerabil mai mare. Desigur, cîteva procente nu înseamnă așa de mult, iar valoarea calculată putea fi îmbunătățită, introducînd „corecții relativiste“, care puteau să aibă o concordanță ceva mai bună cu măsurătorile experimentale. Aceasta

constituia însă doar o îmbunătățire și nu o perfecționare a teoriei.

Și în problema momentului magnetic al electronului au apărut motive de neliniște. În 1925, Goudsmit și Uhlenbeck au arătat că pentru a explica anumite detalii ale spectrelor atomice este necesar să se atribuie electronului anumite momente unghiulare și magnetice¹, cunoscute curent ca fiind *spinul electronului*. La timpul respectiv, reprezentarea naivă asupra electronului considera că acesta este o mică sferă încărcată electric, avînd un diametru de circa 3×10^{-13} cm. Rotirea rapidă a acestei sfere în jurul axei sale era considerată ca fiind sursa momentului magnetic, avînd drept rezultat interacțiuni suplimentare cu momentele magnetice ale altor electroni și cu mișcarea proprie pe orbită. Rezulta însă că pentru a produce cîmpul magnetic necesar, electronul trebuia să se rotească atît de repede încît punctele de la ecuatorul său trebuiau să posede viteze cu mult mai mari decît ale luminii! Iată că și aici, din nou, se năștea un conflict între fizica cuantică și cea relativistă. Devenea clar că fizica relativistă și cea cuantică nu puteau fi pur și simplu adunate. Devenise necesară o teorie mai generală, care trebuia să conțină, armonios unificate, atît ideile relativiste cît și cele cuantice.

Cel mai important pas în această direcție a fost făcut în 1928 de fizicianul englez P.A.M. Dirac, care și-a început cariera ca inginer electrotehnician și care, întîmpinînd greutăți în găsirea unei slujbe mulțumitoare, a făcut o cerere pentru a deveni bursier în fizică la Universitatea din Cambridge. În prezent, cererea sa (care a fost acceptată) este afișată, frumos înrămată, în biblioteca Universității, alături de diploma de laureat al Premiului Nobel pe care el a căpătat-o nu cu mulți ani după ce a trecut de la inginerie la fizica cuantică.

Se întîmplă adesea ca în privința oamenilor de știință vestiți să se nască tot felul de istorii referitoare la „profesorul distrat”. În marea majoritate a cazurilor, aceste istorii nu sînt adevărate, ci mai mult invenții ale unor glumeți; în cazul lui Dirac însă aceste istorioare sînt adevărate, cel puțin

¹ Vezi FRANCIS BITTER, *Magnets*, Editura Doubleday, Science Study Series, 1959.

după părerea autorului. Unele din ele le vom povesti aici, pentru folosul viitorilor istorici.

Fiind un mare fizician teoretician, Dirac prefera să teoretizeze problemele vieții curente, în loc să găsească soluțiile direct din experiență. Odată la o reuniune la Copenhaga, el a formulat o teorie potrivit căreia trebuie să existe o anumită distanță optimă de la care fața unei femei arată cel mai bine. El argumenta că la $d = \infty$ nu se poate vedea nimic, în timp ce la $d = 0$ ovalul feței este deformat, datorită aperturii mici a ochiului uman, iar multe imperfecțiuni (ca micileriduri) apar exagerate. În consecință, există o anumită distanță optimă la care fața arată cel mai bine.

„Spune-mi Paul, l-am întrebat, cit de aproape ai văzut vreodată o față de femeie?”

„O, răspunse Dirac, ținându-și palmele la o distanță de circa 60 cm, cam atât de aproape”.

Cițiva ani mai târziu, Dirac s-a însurat cu „sora lui Wigner” cunoscută sub numele acesta printre fizicieni, deoarece este sora cunoscutului fizician maghiar Eugene Wigner. Odată când a picat la Dirac unul din vechii săi prieteni, care nu auzise încă de căsătoria acestuia, a găsit acolo o femeie atrăgătoare, care a servit ceaiul și pe urmă s-a așezat confortabil într-un fotoliu. „Ce mai faci,” a spus prietenul întrebându-se cu mirare cine ar putea fi femeia. „O, exclamă Dirac, scuză-mă, am uitat să fac prezentările. Este... este sora lui Wigner”.²

Simțul lui Dirac pentru umorul cuantic a fost demonstrat deseori la întîlnirile oamenilor de știință. La Copenhaga, odată, Klein și Nishina comunicau lucrarea lor cu celebra formulă Klein-Nishina care descrie interacțiunile dintre electroni și cuantele gama. După ce și ultima formulă a fost scrisă pe tablă, cineva care tocmai citise manuscrisul articolului, a remarcat că formula scrisă pe tablă are termenul al doilea cu semnul minus, în timp ce în manuscris semnul este plus.

² Într-o recentă discuție cu d-na Dirac (tocmai la Austin, în Texas!) autorul a întrebat-o dacă lucrurile s-au petrecut într-adevăr așa. Ea mi-a spus că ceea ce a spus într-adevăr Dirac a fost: „Dînsa e sora lui Wigner, care acum este soția mea”.

— „Da, spuse Nishina, care prezenta materialul, în manuscris semnul este sigur corect, la tablă însă am făcut undeva o greșeală la semn“.

— „De un număr *impar* de ori!“ a comentat Dirac.

Un alt exemplu al darului de observație ascuțit al lui Dirac se referă la literatură. Prietenul său, Petru Kapitza, fizicianul rus, i-a împrumutat o traducere engleză a cărții lui Dostoievski, *Crimă și pedeapsă*.

Cînd Dirac i-a înapoiat cartea lui Kapitza, acesta l-a întrebat dacă i-a plăcut.

— „E o carte bună, răspunse Dirac, dar într-unul din capitole autorul a comis o eroare. El descrie Soarele ca răsărind de două ori în aceeași zi“. Acesta a fost singurul lui comentariu asupra romanului lui Dostoievski.³

Altădată, în vizită la Kapitza acasă, în timp ce discuta fizică cu acesta, Dirac o urmărea pe Ania Kapitza tricotînd. După vreo două ore de la plecare, Dirac a revenit, extrem de agitat. „Știi, Ania, spuse el, urmărind felul în care tricotai puloverul, a început să mă intereseze aspectul topologic al problemei. Am găsit că mai este și un alt mod de a-l realiza și că, în general, sînt doar două moduri posibile. Unul din ele este acela pe care-l folosești; celălalt este astfel...“ și el a demonstrat acest de al doilea mod, folosindu-se de degetele lui lungi și fine. „Cel de al doilea mod“, redescoperit de dînsul, este de fapt binecunoscut de mult, constată Ania, și nu-i altceva decît „tricotatul cu ochiul pe dos“.

Pentru a termina cu „anecdotele Dirac“, înainte de a trece la rezultatele lui științifice, dați-mi voie să vă povestesc încă una. Cînd s-a trecut la întrebări, după o conferință a lui Dirac la Universitatea din Toronto, cineva din auditoriu a remarcat: „Profesore Dirac, n-am înțeles cum ați dedus formula din partea stîngă, de sus, a tablei“.

— „Aceasta nu este o întrebare, replică scurt Dirac, ci o declarație. Următoarea întrebare, vă rog“.

³ Autorul, care știe acestea de la Kapitza, a fost prea leneș ca să citească *Crimă și Pedeapsă* încă o dată, pentru a găsi capitolul cu pricina. Cititorii cărții de față ar putea să încerce însă.

Să trecem acum la rezultatele lui Dirac în fizică. După cum s-a arătat la începutul acestui capitol, teoria cuantică și teoria relativității nu puteau fi potrivite exact una cu alta, ca două piese din jocul chinezesc de figuri. Se poate obține o potrivire foarte apropiată, dar întotdeauna rămân unele discrepanțe minore care fac soluția nu pe deplin corespunzătoare. Ecuația de undă a lui Schrödinger, din teoria cuantelor, arăta foarte asemănătoare cu ecuația de undă clasică, care descrie propagarea sunetului sau a undelor electromagnetice, dar...

În fizica clasică, cantitățile considerate, fie ele densitatea aerului sau forțele electromagnetice, intră întotdeauna în ecuația de undă sub forma *derivatelor de ordinul doi*⁴; adică sub forma vitezelor de modificare a vitezelor de modificare în raport cu x , y , z și t , scrise convențional ca:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}; \quad \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}; \quad \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}; \quad \text{și} \quad \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}.$$

Soluția exactă matematică a unor astfel de ecuații conduce întotdeauna la unde armonice, care se propagă prin spațiu. Ecuația de undă a lui Schrödinger conținea derivatele de ordinul doi în raport cu x , y și z , dar numai derivata de primul ordin în raport cu t . Explicația vine de acolo că această ecuație fusese dedusă din mecanica clasică newtoniană, în care accelerația unui punct material în mișcare este proporțională cu forța activă. Într-adevăr, dacă x este poziția particulei, viteza acesteia, v , (adică viteza variației poziției punctului cu timpul) este *prima* derivată a lui x în raport cu t

$$\left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)$$

⁴ Noțiunea de derivată este analizată elementar în capitolul 3 („Calculul infinitezimal“) al cărții autorului, *Gravitația*, publicată în 1962, în aceeași serie (a apărut și în Editura Științifică, București, 1966 — *N.T.*). Vezi, de asemenea, *Mathematical Aspects of Physics*, de FRANCIS BITTER, Doubleday, Science Study Series, 1963.

în timp ce *acelerația* acestuia, a , (adică viteza variației vitezei punctului cu timpul) este derivată de ordinul doi:

$$\frac{\partial \left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)}{\partial t}$$

care se scrie în mod obișnuit

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$$

Pe de altă parte, forța F este prima derivată a potențialului P în raport cu poziția:

$$\frac{\partial P}{\partial x}; \quad \frac{\partial P}{\partial y} \quad \text{și} \quad \frac{\partial P}{\partial z}$$

astfel că legea de bază a lui Newton asupra mișcării, care afirmă că accelerația este proporțională cu forța, conține derivatele de primul ordin în raport cu coordonatele spațiale, și derivata a doua în raport cu timpul. Acest fapt face ca ecuația de mișcare a lui Newton privitoare la o particulă să fie din punct de vedere matematic neomogenă, timpul t avind o situație deosebită decît aceea a coordonatelor x , y , z . Această situație, care dura de secole în mecanica clasică, se reflectă în mecanica ondulatorie nerelativistă, a lui Schrödinger, în cadrul căreia spațiul și timpul sînt tratate ca entități complet diferite.

De îndată însă ce încercăm să formulăm legile teoriei cuantice pe o bază relativistă, ne lovim de dificultatea că spațiul și timpul sînt mult mai strîns conectate între ele. Într-adevăr, H. Minkowski, urmînd ideile de bază ale lui Einstein, a formulat noțiunea unui continuu cuadridimensional spațio-temporal în care timpul, multiplicat cu numărul imaginar $i = \sqrt{-1}$, este considerat echivalent cu celelalte trei coordonate spațiale. În universul lui Minkowski nu există nici o diferență între x , y , z și ict (unde c este introdus⁵ din considerații pur dimensionale).

⁵ Factorul c (viteza luminii) este necesar pentru a păstra corecte dimensiunile fizice.

(În această carte, consacrată teoriei cuantelor, nu avem spațiu pentru a discuta teoria relativității în amănunt; cititorul care nu cunoaște acest subiect, poate să se informeze din alte cărți⁶. Autorul trebuie totuși să presupună că persoanele care citesc capitolele următoare au cel puțin o cunoaștere elementară a ideilor de bază ale teoriei lui Einstein.)

După cum am spus mai înainte, ecuația de undă mecanică trebuie să conțină aceleași derivate în raport cu toate cele patru coordonate. Ecuația lui Schrödinger însă, fiind dedusă din ecuația lui Newton, nu satisface această condiție. Primele încercări de a înlătura acest defect au fost făcute, independent, de O. Klein și O. Gordon care au schimbat ecuația de undă nerelativistă a lui Schrödinger, dându-i o formă relativistă, introducând pur și simplu derivatele de ordinul doi în raport cu timpul, în locul derivatelor de ordinul întâi. Dar, cu toate că ecuația de undă a lui Klein-Gordon arată foarte elegant și foarte relativistic, ea suferea de un număr de contradicții interne și toate încercările de a introduce spinul electronului în ea, într-un mod oarecare rațional, au dat totalmente greș.

Și iată că într-o seară a anului 1928, stînd în biroul său de la Colegiul „St. John“, într-un fotoliu, cu lungile lui picioare întinse spre buștenii care ardeau în cămin, Paul Adrien Maurice Dirac a avut o idee extrem de simplă și extrem de strălucitoare.

Deoarece nu se poate obține nici un rezultat corespunzător folosind derivatele de ordinul doi în raport cu coordonata timpului în ecuația de undă relativistă, de ce n-am folosi în ea derivatele de ordinul întâi în raport cu coordonatele spațiale? Desigur, asta ar însemna introducerea mai multor numere imaginare i , dar ar face ecuația de undă simetrică în raport cu spațiul și timpul. În felul acesta a apărut ecuația liniară a lui Dirac (care conținea numai derivatele de ordinul întâi), ecuație care aplicată la atomul de hidrogen a condus de îndată la rezultate strălucite. Toate fragmentările liniilor spectrale care au rezistat cu încăpăținare interpretărilor în funcție de spinii și de momentele magnetice ale electronilor au rezultat în mod absolut

⁶ Vezi HERMANN BONDI, *Relativity and Common Sense*, Doubleday, Science Study Series, 1964.

corect pe baza noii teorii. Acest succes era în mod cu totul deosebit de surprinzător, deoarece, formulându-și ecuația, Dirac urmărea doar să o facă corectă din punct de vedere relativist; electronul cu spin a apărut doar ca o bonificație pentru unirea într-un mod corect a teoriei relativității și a cuantelor. Și acesta nu mai era o mică sarcină electrică ca o sferă în rotație rapidă, ci o sarcină punctiformă care, datorită ecuației lui Dirac, se comportă *ca și cum ar fi* un magnet minuscul.

Dar, scriind ecuația de undă care constituia o unificare perfectă a teoriei relativității și a cuantelor, Dirac trebuia să facă față unei alte dificultăți care fusese caracteristică pentru toate încercările de unificare a acestor două teorii. În conformitate cu vestita relație a lui Einstein, o masă de repaus m_0 (exprimată în grame) este echivalentă cu energia $m_0 c^2$ (exprimată în ergi), c fiind viteza luminii. Dacă această masă se mișcă cu o anumită viteză v , posedând în felul acesta (în primă aproximație) energia cinetică⁷ $K = \frac{1}{2} m_0 v^2$, energia totală este

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cong m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2.$$

Dar⁸, în virtutea proprietăților matematice ale mecanicii relativiste a lui Einstein, trebuie să ne așteptăm și la tipul de mișcare care corespunde la energia totală:

$$E = - \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cong - m_0 c^2 - \frac{1}{2} m_0 v^2$$

Această⁸ ecuație poate fi obținută din cea anterioară, prin înlocuirea lui $+ m_0$ cu $- m_0$, ceea ce din punct de vedere fizic semnifică introducerea unei *mase negative*. În

⁷ Sau, mai exact:

$$m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) - 1$$

care devine egală cu $1/2 m_0 v^2$, dacă $v \ll c$.

⁸ Pentru $v \ll c$.

felul acesta, mecanica relativistă permite, în principiu, două seturi separate de nivele: acela cu energia de repaus $+m_0c^2$ și cu energii mai înalte, și al doilea cu energia de repaus $-m_0c^2$ și mai joase (fig. 26).

În timp ce nivelele de energie reprezentate în partea superioară a diagramei ($E > 0$) corespund la modurile familiare de mișcare a particulelor materiale (electron, proton etc.), nivelele de energie din partea de jos a diagramei ($E < 0$) nu corespund la nici o realitate fizică. Particule cu masă inerțială negativă nu corespund la nimic observat în natură. Într-adevăr, datorită valorii negative a masei lor, ele ar fi accelerate în direcția opusă forței care acționează asupra lor și, pentru a opri din mișcare o particulă de acest fel, ar trebui să o împingem în direcția mișcării sale și nu împotriva ei! Să ne imaginăm două particule, fie doi electroni, care au mase numerice egale, dar de semne opuse ($+m$ și $-m$). În conformitate cu legea lui Coulomb, ele s-ar respinge unele pe altele datorită forțelor electrostatice, care ar avea aceleași valori numerice, dar ar acționa în direcții opuse. Dacă ambele particule au mase pozitive, interacțiunea dă accelerații egale, dar dirijate în sensuri opuse (fig. 27a) și ele se vor îndepărta una de alta, cu viteze crescătoare. Dacă una din particule ar avea masă negativă (fig. 27 b), ea va fi accelerată în aceeași direcție, ca și cealaltă particulă și astfel ele ar zbura împreună, menținând o distanță egală între ele și căpătînd încontinuu o viteză din ce în ce mai mare (mai mică decît c desigur). Aceasta nu este în contradicție cu legea conservării energiei, deoarece energia cinetică, combinată, a celor două particule va fi:

$$\frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{2} (-m)v^2 = 0$$

aceeași care era înainte de a se porni mișcarea. Toată situația aceasta este fantastică, iar particule cu astfel de proprietăți n-au fost niciodată observate.

În mecanica clasică relativistă (care nu ia în considerare fenomenele cuantice), dificultatea particulelor cu masă negativă poate fi ușor înlăturată. Într-adevăr, așa cum se poate vedea din fig. 26, regiunile de energie pozitivă și negativă sînt separate printr-un interval $2m_0c^2$ (de circa un milion

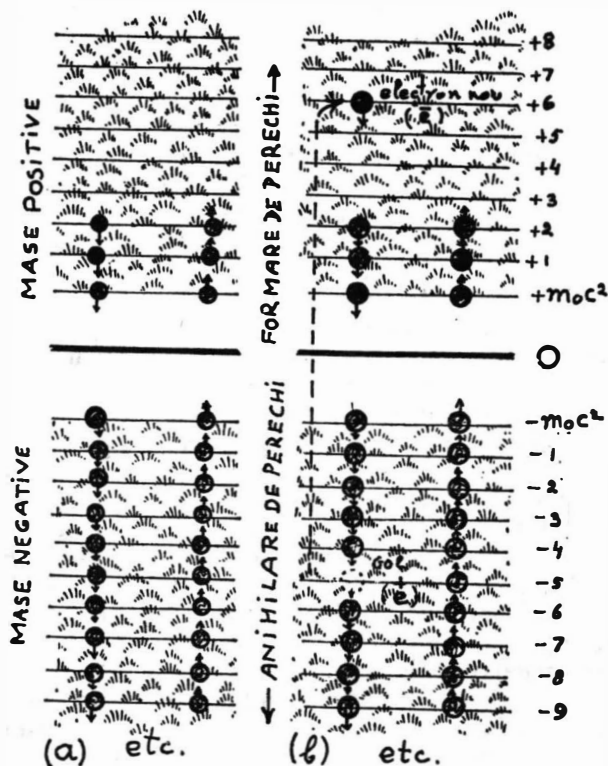


FIG. 26

Tabloul lui Dirac al distribuției nivelelor de energie ale particulelor cu masă pozitivă și negativă. În stînga, (a), toate nivelele de energie negativă sînt complet ocupate și numai șase electroni obișnuiți pot exista pe nivelele pozitive normale. În dreapta, (b), unul din electronii din nivelul negativ este ridicat la un nivel pozitiv, lăsînd în locul lui un „gol” care se comportă ca un electron pozitiv obișnuit cu masă pozitivă. Dacă acest electron suplimentar de pe un nivel pozitiv recade într-un gol (procesul de anihilare a lui e^- și e^+), diferența de energie va fi emisă ca radiație γ .

electroni volți în cazul electronilor). Deoarece în mecanicile necuantice (clasică și relativistă) schimbările de energie trebuie să fie continue, o particulă din partea superioară

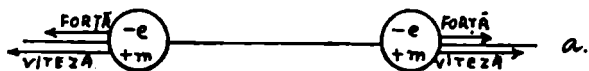


FIG. 27

Interacțiunea între particulele cu masă pozitivă și cele cu masă negativă.

a diagramei nu se poate deplasa în partea inferioară deoarece aceasta ar implica o schimbare discontinuă a energiei particulei. În felul acesta, în descrierea fizică a naturii, stările cu masă negativă puteau fi înlăturate ca fiind posibilități matematice indezirabile. Dar, de îndată ce se introduc fenomenele cuantice, situația se schimbă radical: în teoria cuantică, electronii ca și celelalte particule elementare se complac în a sări de la nivelele mai ridicate la nivelele mai joase. Astfel că în cadrul teoriei cuantice relativiste va avea loc un eveniment paradoxal: toți electronii normali vor sări de la stările cu masă pozitivă la stările cu masă negativă și întregul univers ar înnebuni!

Singurul mod în care Dirac putea să imagineze depășirea acestui paradox era folosirea principiului lui Pauli și consta în a presupune că toate stările care corespund maselor negative sînt în întregime ocupate (cite doi electroni cu spin opus pe fiecare stare) nemărirămînd vreun loc în care electronii din stările cu masă pozitivă să poată sări. Situația este asemănătoare cu cea deja cunoscută a învelișurilor unui atom în care electronul din învelișul N nu poate sări în jos, pe învelișurile L sau K , deoarece acestea sînt complet ocupate de electronii care au venit aici primii. Dar, în timp ce atomii sînt structuri limitate, conținînd un număr finit de electroni, teoria lui Dirac se referă la un spațiu infinit și pretinde un număr infinit de electroni în fiecare centimetru cub de vid și, cu cît mai departe cu atît mai bine,

pretinde să se neglijeze masa infinită a acestor electroni care, în conformitate cu teoria relativistă a gravitației a lui Einstein (numită uneori teoria relativității generale), ar face ca raza de curbură a spațiului gol să fie egală cu zero!

Lăsînd de o parte această dificultate, Dirac și-a pus întrebarea dacă această distribuție de electroni încărcăți negativ avînd mase negative ar putea fi observată, adică detectată cu vreun instrument oarecare fizic de măsură. Răspunsul a fost negativ. Cu nici un fel de dispozitiv electric nu poate fi detectată o distribuție uniformă de sarcină în spațiu, indiferent cît de intensă ar fi ea pe unitatea de volum. Pentru a înțelege această afirmație, să ne imaginăm un pește oceanic, de adîncime, care nu se ridică niciodată la suprafața oceanului și niciodată nu coboară pînă la fundul acestuia. Dacă presupunem că apa oceanului este fără frecare (ceva asemănător cu lichidul de heliu) va trebui să ajungem la concluzia că peștele, oricît ar fi de inteligent, nu va putea spune dacă se mișcă prin apă sau într-un vid absolut. Și, dacă ceva nu poate fi observat, nu trebuie să fie folosit în descrierea fizică a naturii. Peștele nostru de adîncime este obișnuit să vadă diferite obiecte care coboară, fie ele resturi aruncate peste bord de vapoarele care plutesc pe ocean; sau, în cazuri rare, înseși vapoare care coboară. Astfel că, urmîndu-l pe Aristotel, peștele va concepe noțiunea de gravitație care face ca toate obiectele materiale să se miște în jos.

Să presupunem acumă că o sticlă goală de Coca-Cola care se scufundă, sau un transatlantic care se scufundă, are o cantitate oarecare de aer captat care este eliberat cînd acestea se lovesc de fund. Ce va vedea inteligentul nostru pește? El va vedea un ciorchine de sfere argintii (bule de aer, în limbaj uman obișnuit), care se ridică. Ce va gîndi peștele inteligent observînd aceste obiecte? El va fi uluit că acestea se mișcă în direcția opusă forței de gravitație și va fi inclinat să le atribuie o masă cu semn opus față de cea a obiectelor obișnuite care se mișcă în jos.

O analogie ceva mai apropiată poate fi făcută luînd în considerare un atom complex cu învelișurile K , L și M completate, care a fost lovit de o rază X dură și a pierdut unul din electronii din învelișul K . Va rezulta un spațiu gol (un loc vacant Pauli) în învelișul K , iar unul din electro-

nii învelișului L va sări în locul acesta, lăsînd un loc liber în învelișul lui. Următorul pas va fi o tranziție a unui electron mai agil, din învelișul N , în locul vacant din învelișul L . Desigur, există de asemenea posibilitatea ca învelișul M să fixeze învelișul L și locul vacant din învelișul K să fie ocupat direct de unul din electronii M .

FIZICA ANTIPARTICULELOR

Problema poate fi însă considerată și din alt punct de vedere. Faptul că în învelișul K lipsește un electron negativ este echivalent cu prezența unei sarcini pozitive în acest înveliș. Tranziția unui electron negativ de la învelișul L , în jos, la învelișul K , este echivalentă cu ridicarea acestei sarcini pozitive de la învelișul K , în sus, la învelișul L și, ulterior, în sus, la învelișul M . Din acest punct de vedere avem de-a face cu o particulă fictivă, încărcată pozitiv care se mișcă de la nivelul cel mai jos, K , la nivelul mult mai înalt, L , și mai departe, în afară, în spațiul interatomic. Deoarece, în conformitate cu legea lui Coulomb, nucleul încărcat pozitiv trebuie să respingă electronul fictiv încărcat pozitiv, toate-s bune și la locul lor.

Revenind la oceanul lui Dirac, umplut cu electroni încărcăți negativ și avînd mase negative, ne putem întreba cum va recepționa un experimentator situația în care un electron negativ cu masă negativă lipsește de la nivelul său. Evident, rezultă două concluzii simple: (1) absența unei sarcini negative va fi observată ca prezența unei sarcini pozitive. Astfel că experimentatorul va observa o particulă cu o sarcină electrică $+e$; (2) absența unei mase negative este echivalentă cu prezența unei mase pozitive. În felul acesta, particula va avea o comportare normală și va fi observată ca o particulă obișnuită încărcată pozitiv. Ajungînd pînă aici, Dirac și-a extins însă ideea. El a considerat că se poate demonstra că valoarea numerică a masei acestui gol aflat în oceanul electronilor cu masă negativă este aproximativ de 1840 de ori masa unui electron obișnuit. Dacă lucrurile ar sta în realitate astfel, golurile din oceanul lui Dirac ar fi observate ca protoni obișnuiți.

Articolul lui Dirac, publicat în 1930 (sau mai degrabă discuțiile particulare și corespondența anterioară publicării

acestui), au determinat o opoziție violentă față de această idee. Niels Bohr, care din motive necunoscute autorului acestei cărți, se interesa de elefanți, a compus o poveste de vânătoare intitulată *Cum să prinzi elefanți vii*. El a propus vânătorilor africani de vînat mare, următoarea metodă: la locul de adăpare, pe malul unui riu, unde elefanții vin să bea apă și să se spele, se va ridica o pancartă mare, pe care se va expune într-o frază scurtă propunerea lui Dirac. Atunci cînd elefantul, care este un animal proverbial de înțelept, vine să bea apă, citește textul pe pancartă și rămîne pentru cîteva minute vrăjit. Folosind aceste momente vînătorii ascunși în tufișuri se strecoară afară și leagă bine cu frînghii groase picioarele elefantului. După aceea, elefantul poate fi imbarcat pentru Grădina Zoologică Hagenbeck, din Hamburg.

Pauli, căruia de asemenea îi plăcea să glumească, a făcut unele calcule care au arătat că dacă protonii din atomii de hidrogen ar fi golurile lui Dirac, electronii din atomi ar sări în aceste goluri într-o fracțiune neglijabilă de secundă și atomul de hidrogen (ca și atomii tuturor celorlalte elemente) s-ar anihila instantaneu, provocînd o explozie de radiație de înaltă frecvență. Pauli a propus atunci ceea ce se numește „al doilea principiu al lui Pauli“, în conformitate cu care orice teorie sugerată de un teoretician este imediat aplicabilă corpului acestuia. În felul acesta, Dirac ar fi fost transformat în raze gama înainte încă de a fi putut pronunța măcar ceva despre ideea sa.

S-a glumit, s-a glumit; glumă, glumă dar un an după articolul lui Dirac, un fizician american, Carl Anderson, studiînd trecerea electronilor din razele cosmice printr-un cîmp magnetic puternic, a constatat că în timp ce o jumătate dintre aceștia erau deflecți în direcția așteptată corespunzătoare comportării unor particule încărcate negativ, cealaltă jumătate era deviată cu un același unghi *în direcția opusă*. Aceștia erau electronii încărcăți pozitiv, numiți uneori pozitroni, preziși de teoria lui Dirac. Studiile experimentale asupra pozitronilor au arătat că aceștia se comportă întocmai după cum se presupunea că se vor comporta golurile lui Dirac. Cu toate că pozitronii au fost descoperiți pentru prima oară în razele cosmice, s-a stabilit curînd că ei pot fi de asemenea produși în mod simplu și în condiții controlate



N. Bohr și A. Einstein probabil în timpul Congresului Solvay la Bruxelles, în 1930 (fotograf necunoscut)



George Gamow discutind pe un vîrf de munte fizică nucleară cu Leon Rosenfeld
(fotografiat de Rudolph Peierls)

de laborator, prin iradierea unor plăci de metal cu raze gama dure. Așa cum se arată în fig. 28 a, cuanta gama, ciocnindu-se cu nucleul atomic, dispare și întreaga sa energie este convertită în doi electroni, unul negativ și unul pozitiv. Deoarece masa unui electron exprimată în unități de energie, este egală cu 0,5 Mev, procesul are loc numai dacă energia $h\nu$ a razei γ este mai mare decât 1,0 Mev. Surplusul de energie:

$$h\nu - 2m_0c^2$$

este comunicat perechii de electroni (e , e^+) „creată” prin ciocniri. Soarta acestor doi electroni este complet diferită. Electronul negativ (obișnuit) e^- este treptat încetinit prin ciocnirile cu alți electroni negativi care formează materia

și devine unul din aceștia. Electronul pozitiv e^+ nu trăiește mult timp, ci este anihilat prin ciocnirea cu unul din electronii negativi (obișnuiți) emitându-se două cuante γ (fig. 28 b) Termenii „creați” și „anihilați” nu trebuiesc înțeleși în sens metafizic; se poate tot așa de bine spune că gheața este „creată” din apă cînd aceasta este adusă sub punctul de înghețare și „anihilată” la temperatura camerei, transformîndu-se în apă. Legile de conservare ale masei și energiei (care în prezent constituie o singură lege datorită formulei lui Einstein $E = mc^2$) sînt respectate în ambele procese, și avem de-a face aici doar cu o transformare pe baze egale a radiației în particule și a particulelor în radiație.

Detectarea antielectronilor (pozitronilor) a ridicat problema dacă există de asemenea sau nu și antiprotoni, particule avînd aceeași masă ca a protonului, dar purtînd o sarcină negativă. Deoarece protonul este cam de 1840 ori mai greu decât un electron, producerea unei perechi proton-antiproton cere energii de miliarde de electronivolți și nu de milioane. Ținînd seama de aceasta, Comisia pentru Energia Atomică a cheltuit sume proporționale de dolari pentru a construi acceleratoare care să poată imprima proiectilelor nucleare cantitățile necesare de energie. Și, în cîțiva ani, în Statele Unite au fost construite două acceleratoare uriașe: *Bevatronul* de la laboratorul de radiații al Universității din California, la Berkeley; și *Cosmotronul* de la laboratorul național din Brookhaven, la Long Island, New York.

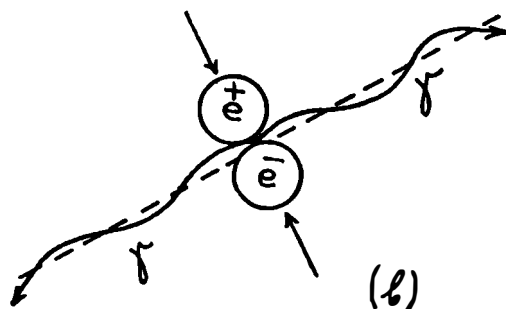
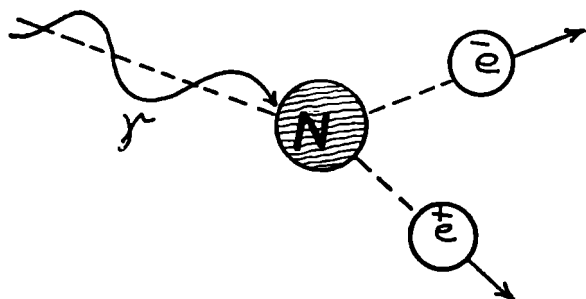


FIG. 28

„Crearea” și „anihilarea” electronilor negativi și pozitivi (e^- și e^+), în conformitate cu teoria lui Dirac: (a) o rază gama de energie mare lovește un nucleu (N) și se transformă, într-o pereche e^- și e^+ ; (b) o pereche e^- și e^+ se ciocnește în spațiul liber și produce două raze gama ce se mișcă în direcții opuse.

Imediat în urmă au fost construite mașini asemănătoare în Europa, la CERN lângă Geneva, Elveția, și în Uniunea Sovietică, lângă Moscova. A fost ca o întrecere strinsă care în cele din urmă a fost câștigată de californieni, când în octombrie 1955 Emilio Segré și colaboratorii săi au anunțat că au detectat protoni negativi emiși de ținte bombardate.

Ulterior, ei au descoperit de asemenea antineutronii, particule care anihilează în ciocnirile cu neutronii obișnuți. După cum vom vedea mai departe în această carte, toate particulele descoperite mai recent (diferite tipuri de mezoni și hyperoni) posedă de asemenea antiparticulele lor.

Și iată că, deși Dirac nu a avut succes în intenția sa inițială de a explica protonul ca un antielectron, a deschis totuși largul câmp al fizicii antiparticulelor.

În legătură cu antiparticulele există două mistere nerezolvate. Atomii care formează globul nostru pământesc sînt construiți din electroni negativi, protoni pozitivi și neutroni obișnuți. În conformitate cu studiile astronomice, același lucru este adevărat în ceea ce privește întregul sistem planetar și însuși Soarele. În fapt, protonii și electronii emiși de Soare care pătrund în atmosfera terestră sînt protonii pozitivi și electronii negativi (obișnuți). Mai puțin sigură, dar probabil adevărată, este afirmația că toate stelele și materialul interstelar din Calea Lactee sînt formate din materie obișnuită, deoarece în caz contrar din toate direcțiile galaxiei noastre ar trebui să se observe radiații gama intense. Ce se poate spune însă despre miliardele de alte galaxii care sînt separate prin milioane de ani-lumină de Calea Lactee? Este oare universul nostru asimetric, fiind format în întregime din materie „obișnuită“, sau este format dintr-o colecție de galaxii din care o jumătate sînt compuse din materie „obișnuită“, iar cealaltă jumătate din „antimaterie“? Noi nu cunoaștem acest lucru și pare-se că nu există o cale de a-l afla.

O altă șaradă este aceea, dacă antiparticulele pe care le producem din abundență, în acceleratorii noștri moderni au o masă gravifică pozitivă sau negativă. La prima privire se pare că la această întrebare se poate răspunde ușor prin experimentare directă. Într-adevăr este suficient să se producă într-un accelerator de energie mare un fascicul de antiprotoni care să fie trimis orizontal, de-a lungul unui tub ghidat, și să se observe dacă sub acțiunea gravitației terestre fasciculul deviază în jos, ca o piatră aruncată orizontal, sau el deviază în sus. Dacă s-ar întîmpla să fie al doilea caz, el ar putea fi explicat, conchizînd că antiparticulele sînt respinse de masa Pămîntului. Elementul turburător este însă că antiparticulele produse în laboratoarele

noastre se mișcă cu viteze aproape egale cu aceea a luminii (3×10^{10} cm/s). Așa că, dacă tubul are, să zicem, o lungime de 3 km (3×10^5 cm), antiparticulele îl vor străbate într-un interval de timp de 10^{-5} s. Conform legii căderii libere, ele se vor deplasa în jos (sau în sus în cazul maselor gravifice negative) cu $1/2 g t^2$ cm, unde g este de circa 10^3 cm/s². Dacă t este egal cu 10^{-5} s, deplasarea verticală va fi de ordinul $10^3 \times 10^{-10} = 10^{-7}$ cm, distanță care este comparabilă cu diametrul atomului! Este evident că nici un fel de instalație experimentală nu este în stare să detecteze o deplasare atât de mică a fasciculului. Pentru a realiza experiența, s-ar putea însă să se încerce micșorarea vitezei antiparticulelor la viteze mai rezonabile, să zicem la câțiva centimetri pe secundă, viteze la care devierea în sus sau în jos ar deveni ușor sesizabilă. Cum s-ar putea face însă aceasta? În pilele atomice neutronii sint frinați, făcându-i să treacă prin diferiți „moderatori” (carbon sau apă grea) în care neutronii își cedează treptat energia lor în interacțiunile cu ceilalți atomi. În cazul antiparticulelor însă nu putem proceda în modul acesta, deoarece acestea, trecând prin orice moderator făcut din materie obișnuită, ar fi anihilate de la prima interacțiune. Astfel, problema rămâne încă nerezolvată.

În concluzie, se poate afirma că dovedirea existenței masei gravifice negative a antiparticulelor ar fi deosebit de folositoare pentru rezolvarea multor probleme cosmologice. Dacă atât particulele obișnuite cât și antiparticulele ar fi inițial uniform distribuite în univers, atracția gravifică dintre particulele de același fel și respingerea ipotetică gravifică între particulele de tip deosebit ar duce la separarea mutuală a acestora. În felul acesta s-ar forma mari regiuni ale spațiului, umplute exclusiv cu materie obișnuită și alte regiuni umplute exclusiv cu antimaterie. O astfel de separație ar satisface noțiunii noastre de simetrie a naturii. Noi nu cunoaștem însă acest lucru și nu știm, de asemenea, dacă vreodată îl vom cunoaște sau nu.



E. FERMI ȘI TRANSMUTAȚIA PARTICULELOR

În timpurile de demult, fiecare fizician putea stăpîni atît latura experimentală cît și cea teoretică a științei sale. Exemplul cel mai remarcabil îl constituie Sir Isaac Newton, care a creat teoria gravitației universale (elaborînd în scopul acesta disciplina matematică, cunoscută astăzi sub numele de calcul diferențial). El a efectuat de asemenea importante studii experimentale care au dovedit că lumina albă se formează prin suprapunerea unui spectru de diferite culori, și a fost primul care a construit un telescop reflector. Pe măsură însă ce cîmpul fizicii a devenit mai larg, tehnicile experimentale și metodele matematice au devenit din ce în ce mai complicate, mult prea mult pentru ca un singur om, fie el oricine, să le poată stăpîni simultan. Profesia de fizician s-a separat în două ramuri — „experimentatori” și „teoreticieni”. Marele teoretician Albert Einstein nu a efectuat nicio dată vreun experiment (cel puțin din cîte cunoaște autorul), în timp ce marele experimentator Lord Rutherford era atît de slab în matematică, încît faimoasa formulă Rutherford pentru difracția particulelor α a fost dedusă pentru dînsul de un tînăr matematician, R.H. Fowler. Astăzi, ca regulă, un fizician teoretician nu îndrăznește să se atingă de vreo instalație experimentală, de frică să n-o defecteze (vezi efectul

Pauli, în capitolul III), în timp ce experimentatorii se simt pierduți în fluviul turbulent al calculelor matematice.

Enrico Fermi, care s-a născut în 1901 la Roma, constituie un exemplu rar de fizician, tot atât de excelent teoretician, ca și experimentator. Una din contribuțiile sale importante în domeniul fizicii teoretice a fost studiul gazului electronic degenerat, care a avut consecințe importante în teoria electronică a metalelor ca și în înțelegerea stelelor supradense, cunoscute ca piticele albe. O altă lucrare importantă a fost formularea teoriei matematice a transmutației particulelor, care includea emisia misterioaselor particule lipsite de sarcină și lipsite de masă, propuse anterior de Pauli.

Fermi a fost un cetățean al Romei, voinic, cu un puternic simț al umorului. Pe când era încă profesor la Universitatea din Roma, Mussolini i-a acordat titlul de: „Eccellenza“ (Excelență). S-a întâmplat odată ca Fermi să fie obligat să se ducă la o adunare a Academiei de Științe, la Palazzo di Venezia, care era puternic păzit, deoarece Mussolini în persoană urma să ia cuvântul. Toți ceilalți membri au sosit în mari limuzine de marcă străină, conduse de șoferi în uniformă, în timp ce Fermi s-a apropiat în micul său Fiat. La poarta de intrare el a fost oprit de doi *carabinieri*, care și-au încrucișat armele în fața micului său automobil și l-au întrebat ce caută acolo. În conformitate cu cele povestite de către dînsul autorului acestei cărți, Fermi a ezitat să răspundă gardienilor: „Sînt Excelența sa Enrico Fermi“, de frică că aceștia nu-l vor crede. Atunci, pentru a evita încurcăturile, el a răspuns: „Sînt șoferul Excelenței Sale, Signore Enrico Fermi“. „*Ebbene*“, au răspuns gardienii, „intră, parchează și așteaptă-ți stăpînul“.

Deși ideea particulelor lipsite de sarcină și lipsite de masă care însoțesc electronii emiși în transformările β a fost propusă inițial de Pauli, Fermi a fost primul care a dezvoltat teoria matematică riguroasă a dezintegrării β , cuplată cu emisia particulelor răsfățate ale lui Pauli, și a arătat concordanța ei deplină cu faptele observate. El, este, de asemenea, și autorul numelui lor actual, *neutrino*. Pauli și-a denumit protejatul ca fiind *neutron*, fapt care era în regulă, deoarece particula numită astăzi „neutron“ (protonul fără sarcină), nu era încă descoperită. Cu toate acestea, numele nu căpătase „drept de autor rezervat“, deoarece fusese utilizat nu-

mai în discuții particulare și în scrisori, dar niciodată în tipărituri. În 1932, când James Chadwick a demonstrat existența unei particule neîncărcate, cu masă foarte apropiată de cea a protonului, el a numit-o *neutron*, în articolul său pe care l-a publicat în *Proceedings of the Royal Society of London*. Când Fermi, care mai era încă profesor la Roma, a comunicat descoperirea lui Chadwick, la seminarul săptămânal de fizică, cineva din auditoriu a întrebat dacă „neutronul lui Chadwick” este unul și același cu „neutronul lui Pauli”. „Nu, răspunse Fermi (care vorbea, natural, în italiană), *i neutroni di Chadwick sono grandi e pesanti. I neutroni di Pauli sono piccoli e leggeri; essi debbono essere chiamati neutrino*”¹.

Aducând această contribuție filologică, Fermi a purces la dezvoltarea unei teorii matematice a transformării β , în care un electron (pozitiv sau negativ) și un neutrino sînt emiși simultan de nucleele atomice instabile, împărțindu-și statistic între ele energia aflată la dispoziție. El și-a construit teoria pe linii similare cu teoria emisiei de lumină de către atomi, în cadrul căreia un electron excitat efectuează o tranziție la o stare de energie mai joasă, în cadrul procesului, eliberînd energia suplimentară în forma unei unice cuante de lumină. Mișcarea electronului înaintea tranziției discontinue este descrisă de o funcție de undă care se extinde pe un domeniu comparativ larg. După tranziție, funcția de undă a electronului se reduce la o dimensiune mai mică, iar energia eliberată formează o undă electromagnetică divergentă, care se propagă în întregul spațiu înconjurător. Forțele care determinau această transformare erau forțele cunoscute care se exercită între cîmpul electromagnetic și sarcina punctuală. Astfel că efectul lor putea fi ușor dedus pe baza teoriei existente. S-a constatat că probabilitățile deduse pentru tranzițiile electronice erau în concordanță perfectă cu intensitățile liniilor spectrale observate.

În teoria dezintegrării β , Fermi a trebuit să facă față unei situații mult mai complicate. În cazul acesta, neutronul, care ocupă o anumită stare energetică în interi-

¹ În limba italiană, *neutrino* este diminutivul lui *neutrone*; cu alte cuvinte, „micul neutron”. Replica lui Fermi este: „Nu, neutronii lui Chadwick sînt mari și grei, iar neutronii lui Pauli sînt mici și ușori; ei trebuie numiți *neutrini*”.

orul nucleului, se transformă într-un proton, modificându-și în modul acesta sarcina electrică. De asemenea, în locul unei singure cuante de lumină, sînt emise simultan două particule (un electron și un neutrino).

FORȚELE CARE DETERMINĂ TRANSFORMĂRILE β

Dificultatea majoră a constatat însă în faptul că, spre deosebire de cazul emisiei de lumină în care forțele care determină procesul sînt forțele cunoscute electromagnetice, cele care determină transformarea β erau complet necunoscute și Fermi a trebuit să facă o presupunere asupra ceea ce ar putea ele să fie. El a decis, ceea ce este caracteristic pentru un geniu, să facă presupunerea cea mai simplă posibilă și anume că probabilitatea unei treceri a unui neutron într-un proton (sau invers) și care dă drept rezultat formarea unui electron (negativ sau pozitiv) și a unui neutrino² este simplu proporțională cu produsul intensităților celor patru funcții de undă corespunzătoare în fiecare punct dat din interiorul nucleului. Coeficientul de proporționalitate, pe care Fermi l-a notat cu litera g , urma să fie determinat prin comparație cu datele experimentale. Folosind un aparat matematic suficient de complicat, Fermi a reușit să deducă cum ar trebui să fie forma spectrului energetic β și în ce mod ar trebui să depindă viteza dezintegrării β de cantitatea de energie implicată, în cazul în care ipoteza sa simplă asupra interacțiunii ar fi corectă. Rezultatul s-a dovedit în concordanță strălucitoare cu curbele observate.

Singurul cusur al teoriei lui Fermi a dezintegrării β consta în aceea că valoarea numerică a constantei g (3×10^{-14} , în unități fără dimensiune³) nu putea fi dedusă din teorie și trebuia să fie luată direct din observații. Valoarea extrem de mică a lui g explică faptul că, în timp ce emisia unei cuante γ decătre nucleu are loc o dată la 10^{-11} secunde, emisia

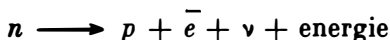
² Nu vom introduce aici și distincția dintre un neutrino și un antineutrino.

³ $|g| \cdot \frac{|mc^2|}{|\sqrt{2\pi\hbar^3}|}$, unde m este masa electronului, c viteza luminii și $\hbar$ constanta cuantică.

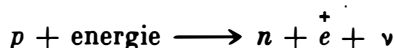
unei perechi electron-neutrino poate avea loc la intervale de ore, luni sau chiar ani. Datorită acestui fapt, toate transmutațiile particulelor sînt cunoscute în fizica modernă ca *interacțiuni slabe*. Explicarea caracterului extrem de slab al acestor interacțiuni, care intervin în toate procesele în care are loc o emisie sau captură de neutrino, constituie o sarcină de viitor a fizicii.

FOLOSIRE A LEGILOR DE INTERACȚIUNE ALE LUI FERMI

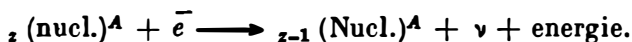
În mod analog cu procesul de dezintegrare⁴ β



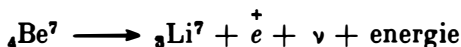
și cu



există și alte procese care urmează de asemenea legile de interacțiune ale lui Fermi. Unul din ele este captura unui electron atomic de către un nucleu instabil față de dezintegrarea β pozitivă. În loc de a emite un electron pozitiv și un neutrino, un nucleu poate să capteze un electron negativ din propria sa pătură de electroni, emițînd un neutrino în concordanță cu formula:

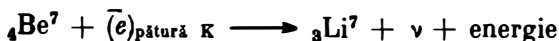


Deoarece electronul atomic captat de către nucleu în cadrul unui astfel de proces este unul din electronii din pătura K (cea mai apropiată de nucleu), acesta este cunoscut în mod obișnuit sub numele de „captură K”. Cel mai simplu exemplu de un astfel de proces îl constituie izotopul instabil de beriliu, Be^7 , care poate să transmută fie după formula



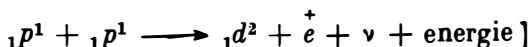
⁴ În conformitate cu considerațiile energetice, primul proces are loc atît în cazul neutronului liber, cît și în cazul neutronilor legați în interiorul nucleului, în timp ce cel deal doilea are loc numai în nucleele complexe, în care energia suplimentară necesară poate fi obținută de la alți nucleoni.

sau⁵



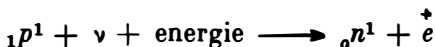
În acest din urmă caz fotografiile de la camera cu ceață vor arăta numai o singură urmă (aceea a lui ${}_3\text{Li}^7$) și situația este similară cu incidentul descris de H.G. Wells, în romanul lui binecunoscut *Omul invizibil*, în care un polițist din Londra era lovit cu piciorul în spate și, introducându-se, nu vedea pe nimeni care ar fi putut să-i tragă un picior. Studiile experimentale asupra proceselor de captură K au arătat că frecvența acestora este în concordanță exactă cu ceea prezisă de teoria lui Fermi.

Un alt proces interesant care face parte din aceeași categorie este reacția H-H (hidrogen-hidrogen), propusă pentru prima oară de Charles Critchfield, și care constituie sursa energiei produse în Soarele nostru și în alte stele epuizate⁶. În timpul scurtului interval de timp în care doi protoni în colizie sînt în contact strîns, unul din ei transmută într-un neutron, emițînd un electron pozitiv și un neutrino, formîndu-se în felul acesta un nucleu de deuteriu (hidrogen greu) în conformitate cu ecuația:



Probabilitatea acestui proces poate fi prezisă exact pe baza teoriei lui Fermi.

Ultimul, dar nu cel mai puțin important exemplu de interacțiune Fermi, este procesul cu ajutorul căruia F. Reines și C. Cowan au dovedit în mod direct existența neutrinilor. Acesta este:



Reines și Cowan au observat această reacție într-o cameră amplasată în apropierea unei „pile atomice” la instalațiile de la Savannah River. Numărul neutronilor și electronilor

⁵ Indicele inferior din stînga simbolului dă numărul atomic, iar indicele superior din dreapta dă greutatea atomică.

⁶ În cazul stelelor mai strălucitoare, de exemplu Sirius, reacția care produce majoritatea energiei este așa-numitul ciclu de carbon, propus în mod independent de C. von Weizsäcker și H. Bethe.

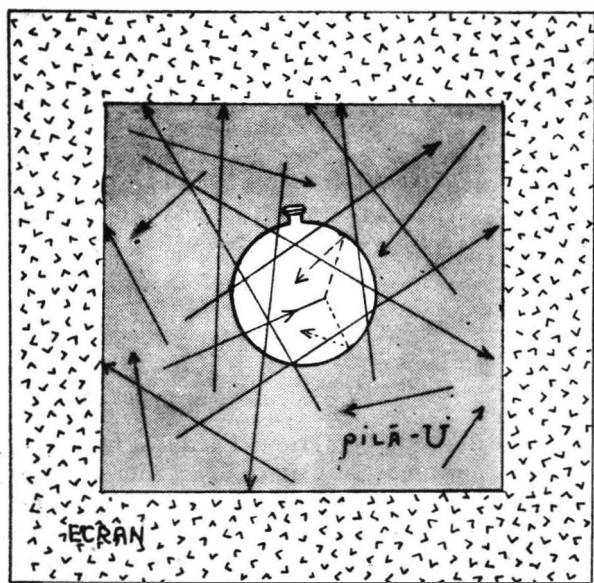
pozitivi observați, formați simultan în camera supusă unui bombardament extensiv de neutrini s-a arătat a fi exact egal cu cel prezis de teoria lui Fermi. Interacțiunea este atât de slabă, încît pentru a absorbi o jumătate din neutrinii emiși ar fi necesar să se folosească un ecran de hidrogen lichid gros de cîțiva ani-lumină! Teoria lui Fermi a proceselor care implică neutrini se aplică de asemenea în multe cazuri de dezintegrare a particulelor elementare noi, descoperite în ultimii ani, și astăzi se vorbește de „interacțiunea Fermi generalizată“.

CERCETĂRILE LUI FERMI ÎN DOMENIUL REACȚIILOR NUCLEARE

În paralel cu studiile sale teoretice, Fermi a luat parte la vaste cercetări experimentale asupra reacțiilor nucleare din elementele grele bombardate cu neutroni lenți și în cele de sinteză a elementelor transuraniene ($z > 92$), lucrări pentru care a cîpătat Premiul Nobel pe 1938. Îndată după asta, s-a mutat în Statele Unite și a participat, în 1939, la Conferința de la Universitatea George Washington, la care Niels Bohr a citit o telegramă de la Lise Meitner, cunoscuta fiziciană germană (care pe atunci trăia la Stockholm), telegramă care conținea noutăți senzaționale. Ea îi comunica lui Bohr că foștii ei colaboratori, Otto Hahn și Fritz Strassman, la Berlin, au stabilit că un nucleu de uraniu lovit de un neutron se sparge în două părți aproximativ egale, eliberînd cantități mari de energie. Această comunicare a determinat declanșarea unei serii de evenimente care au culminat, nu cu mulți ani mai tîrziu, cu bombe nucleare, uzine de putere nucleară etc. vestind începutul a ceea ce adesea este numit era atomică (nucleară ar fi mai corect).

Fermi a preluat conducerea laboratorului arhisecret de la Universitatea din Chicago și la 2 decembrie 1942 a anunțat că în după-amiaza respectivă a fost realizată prima reacție în lanț în uraniu, pornind astfel prima eliberare controlată de către om a energiei nucleare.

Deoarece această carte este consacrată progresului în înțelegerea naturii lucrurilor, nu aplicațiilor practice, noi vom evita orice discuție asupra reacției de fisiune în lanț și



——— URMĂ- n
 - - - - - URMĂ- p
 URMĂ- $\bar{e}$

FIG. 29

Butelia lui Fermi amplasată în interiorul unei pile de uraniu cu scopul de a măsura viața medie a neutronului.

vom termina acest capitol cu descrierea unei experiențe interesante realizată de Fermi în reactorul de fisiune nou inventat. Pentru prima oară a devenit posibil să se măsoare timpul de viață mediu al unui neutron, care în ultimă instanță se dezagregă într-un proton, un electron și un neutrino. Dispozitivul folosit în această experiență este cunoscut sub numele de „butelia lui Fermi“, cu toate că de fapt era un container sferic, oarecum asemănător unei sticle de Chianti, dar fără git. După cum se arată în fig. 29, sfera a fost amplasată în interiorul unei pile atomice și lăsată acolo o perioadă de timp considerabilă, în timp ce pila lucra. Neutronii de fisiune, în mari cantități, străbătând în toate direcțiile pila, în cele mai multe din cazuri intrau și părăseau

„butelia lui Fermi“, trecînd fără dificultate prin pereții acesteia. Din cînd în cînd însă, neutronul trecînd prin „butelie“ urma să se spargă într-un potron și un electron, pentru care pereții „buteliei“ erau impenetrabili. În felul acesta, în interiorul „buteliei“ se acumula treptat gaz de hidrogen cu o viteză care depindea de șansa ca un neutron să se spargă în timp ce trecea prin aceasta. Măsurînd cantitatea de hidrogen acumulată în „butelie“, într-o perioadă de timp dată, se putea ușor estima timpul de viață mediu al neutronului, care s-a arătat a fi aproximativ de 14 minute.

Pentru a cunoaște mai mult despre activitatea lui Fermi pe liniile mai sus menționate, cititorul poate să se adreseze cărții *Atoms in the Family*⁷, scrisă după moartea acestuia, de soția sa, Laura.

⁷ *Atomii la noi acasă.* — N.T.



H. YUKAVA
ȘI
MEZONII

Marele succes al teoriei lui Fermi a dezagregării β a ridicat problema dacă ea ar putea sau nu fi folosită pentru explicarea forțelor de atracție care mențin împreună nucleonii. La timpul respectiv se cunoștea că forțele dintre doi nucleoni — fie ei doi neutroni, un neutron și un proton sau doi protoni — sînt identice, cu excepția că în ultimul caz este nevoie să se adauge obișnuita respingere Coulomb dintre sarcinile protonilor. Experiențele au arătat că, spre deosebire de forțele coulombiene, care scad relativ lent cu distanța (ca $1/r^2$), forțele nucleare sînt mai asemănătoare cu forțele de coeziune din fizica clasică. Exact în același mod în care două fișii de bandă de lipit nu exercită nici o forță una asupra celeilalte, indiferent cît de aproape s-ar afla una de alta, dar se lipsesc puternic de îndată ce sînt puse în contact, forțele dintre nucleoni apar brusc cînd ei se „ating unul de altul“, fapt care se întîmplă la o distanță de circa 10^{-13} cm. De îndată ce acest lucru se întîmplă, este necesară o energie de circa zece milioane de electronivolți pentru a-i separa din nou.

Forțe asemănătoare care acționează între atomi sînt puse pe seama schimbului de electroni dintre păturile atomice, de îndată ce acestea intră în contact. Teoria mecanică ondulatorie a acestor „forțe de schimb“ a fost dezvoltată în 1927

de W. Heitler și F. London, care au arătat că problema poate fi rezolvată exact în cazul simplu a doi atomi de hidrogen care formează o moleculă biatomică¹. Heitler și London au luat în considerare două cazuri: (1) o moleculă de hidrogen ionizată, H_2^+ , constând din doi protoni și un electron; (2) o moleculă de hidrogen neutră, H_2 , formată din doi protoni și doi electroni (fig. 30a și 30b).

Pentru ambele cazuri a fost rezolvată complet ecuația de undă a lui Schrödinger pentru mișcarea electronilor. Rezultatul analitic a arătat că există o stare de echilibru de energie minimă pentru anumite distanțe R și R^1 între cele două nuclee. Energia calculată din aceste stări de echilibru s-a dovedit a fi în concordanță perfectă cu energiile de disociere, măsurate, ale moleculelor H_2^+ și H_2 . În felul acesta, noțiunea de forță de schimb între doi atomi identici a fost stabilită cu fermitate în domeniul chimiei cuantice.

A fost cu totul natural să se presupună că forțele de atracție dintre nucleoni ar putea să fie explicate pe o bază asemănătoare. Atunci când doi nucleoni sint aduși în strinsă apropiere, un electron acompaniat de un neutrino ar sări mereu de pe unul pe altul, producând în felul acesta o forță de schimb de atracție. A fost o idee foarte bună, dar (vail) nu a corespuns. Când, în 1934, D. Ivanenko și I. Tamm au calculat forța de schimb dintre doi nucleoni care rezultă datorită interacțiunii Fermi, ei au constatat că energia de legătură așteptată este de ordinul a 10^{-8} electronivolți! Nu, aceasta nu este o greșeală de tipar; o sutime de milionime dintr-un electronvolt, în loc de zece milioane de electronivolți; exact cu 15 ordine de mărime mai puțin! Evident, interacțiunea „slabă” Fermi nu putea să fie cauza legăturii puternice a protonilor și neutronilor din interiorul nucleului atomic.

Un an mai târziu (în 1935), un fizician japonez, Hideki Yukawa, a propus o idee revoluționară pentru a explica interacțiunile tari dintre nucleoni. Dacă aceste interacțiuni nu pot fi explicate prin forțele de schimb ce iau naștere datorită trecerii încoace și încolo a perechilor de electroni-neutrino, trebuie să existe o particulă complet nouă, pînă atunci nedetectată, particulă care trebuie să facă aceste treceri. Pentru a

O moleculă biatomică este molecula compusă din doi atomi.

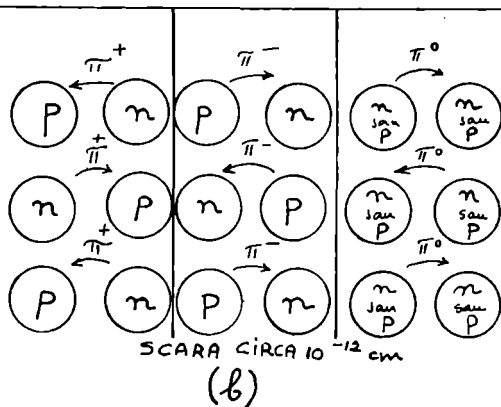
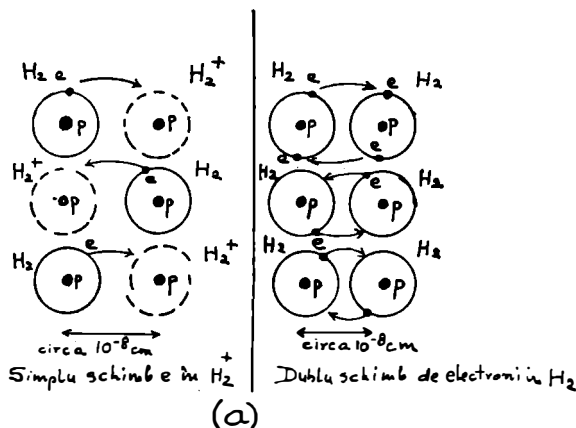


FIG. 30

Forțe de schimb. (a) Teoria lui Heitler și London asupra forțelor care mențin împreună doi protoni în molecula de hidrogen ionizată și în cea neutră. (b) Trei posibilități diferite de explicare a forțelor nucleare prin schimbul de pioni (π^+ , π^- , π^0).

obține puterea de legătură cerută de datele experimentale, această particulă ar trebui să fie de circa două sute de ori mai grea decât un electron (sau de circa zece ori mai ușoară decât un proton). De asemenea, interacțiunea acestora cu nucleonii,

caracterizată de constanta y de interacțiune a lui Yukawa, trebuie să fie de circa 10^{14} ori mai mare decât constanta g de interacțiune Fermi, responsabilă pentru transformările β , în felul acesta ea fiind comparabilă cu interacțiunile obișnuite Coulomb dintre sarcinile electrice. Această particulă ipotetică a fost cunoscută sub multe nume: yukon, electron japonez, electron greu, mesotron și, în fine, mezon. Doi ani după propunerea lui Yukawa, C. Anderson și S. Neddermeyer, de la Institutul Tehnologic din California, au găsit în razele cosmice particule cu o masă de 207 ori mai mare decât cea a electronilor, și ele păreau că dau o confirmare strălucită ipotezei lui Yukawa. A urmat însă un regres temporar. O serie de experiențe efectuate de M. Connerly, E. Pancini, O. Piccioni au demonstrat fără nici un fel de posibilitate de dubiu că deși noile particule au masa mezonilor ipotetici ai lui Yukawa, interacțiunea lor cu nucleonii este de 10^{12} ori mai mică decât ar fi fost necesar pentru explicarea forțelor nucleare. De-abia în anul 1944, fizicianul englez C. F. Powell, trimițând plăci fotografice în straturile superioare ale atmosferei, a arătat că mezonii observați la nivelul mării (cu masă de 207 ori masa electronilor) sînt produsele de dezintegrare a unor mezonii grei (cu masă de 264 ori masa electronului) formați de razele cosmice în straturile superioare ale atmosferei terestre. Există, prin urmare, două feluri de mezonii: grei și ușori. Primii sînt cunoscuți astăzi ca mezonii π , sau simplu, pioni, în timp ce ceilalți sînt cunoscuți sub numele de mezonii μ , sau pe scurt, miuoni. Pionii arată să aibă interacțiuni foarte puternice cu nucleonii și e greu să avem vreun dubiu că ei sînt particulele considerate inițial de către Yukawa ca fiind cauza forțelor nucleare. Nu există însă pînă în prezent o teorie exactă a acestor procese (comparabilă, de exemplu, cu teoria lui Dirac a antiparticulelor).



Cititorul a observat, desigur, că treptat, capitolele acestei cărți devin din ce în ce mai scurte. Lucrul acesta se datorează nu oboselii crescînde a autorului, ci mai curînd faptului că după strălucita evoluție din primii săi treizeci de ani, Teoria Cuantică s-a împotmolit în mari dificultăți și progresul ei a fost puternic frînat. Ultimul „capitol complet finisat” al acestei perioade a constatat în unificarea de către Dirac a mecanicii ondulatorii cu teoria relativității restrînse, unificare care a avut ca rezultat eleganta teorie a antiparticulelor. După ce au fost descoperite și experimental, antiparticulele au dovedit că se comportă exact așa cum prevăzuse teoria.

Teoria lui Fermi cu privire la procesele care implică emisii și absorbții de perechi electron-neutrino devine însă destul de vagă dacă este aplicată unor procese mai complicate, cum ar fi, de exemplu, dezintegrarea unui miun într-un electron și doi neutrini. De asemenea, valoarea numerică a constantei Fermi, g , nu poate fi dedusă din valorile celorlalte constante universale. (În mod asemănător, constanta lui Rydberg, R , din spectroscopia clasică, rămăsese o constantă empirică pînă ce Bohr nu și-a publicat teoria asupra atomului de hidrogen.)

Dificultăți similare se întâmplă și în cadrul teoriei lui Yukawa a interacțiunilor tari dintre particulele elementare, valoarea numerică a constantei y nefiind nici pînă azi explicată. Cercetarea experimentală descoperă încontinuu o cantitate imensă de noi fapte și se formulează numeroase reguli empirice cu ajutorul unor noțiuni introduse ad hoc, ca „paritate“, „straneitate“ etc. Luată în ansamblu, situația actuală seamănă, în multe privințe, cu cea existentă în optică și în chimie pe la sfîrșitul secolului trecut, cînd regularitățile din seriile spectrale și din proprietățile chimice ale elementelor erau bine cunoscute empiric, dar nu erau de loc explicate teoretic. Situația s-a îmbunătățit brusc, cînd s-a elaborat teoria cuantică a structurii atomice, care a clarificat toate datele empirice adunate cu trudă. După părerea autorului, teoria particulelor elementare va putea ieși din impasul în care se află în prezent — poate în anul viitor sau poate în anul 2000 — numai cu ajutorul unei idei noi, care se va deosebi de actualul mod de a gîndi tot atît de mult pe cît acesta din urmă diferă de cel clasic. Nu dispunem de sfera magică de cristal cu ajutorul căreia am putea prevedea evoluția ulterioară a fizicii teoretice, dar în locul ei, am putea apela la disciplina cunoscută sub numele de „analiză dimensională“. Oricine știe că toate operațiile de măsurare din fizică se bazează pe *trei mărimi fundamentale*:

Lungimea (stadii, mile, leghe, metri etc.)

Timpul (ani, zile, milisecunde etc.)

Masa (pietre, livre, drahme, grame etc.)

Toate mărimile fizicii pot fi exprimate prin acestea trei, cu ajutorul așa-numitelor „formule dimensionale“. De exemplu, *viteza* (V) este lungimea (sau distanța) parcursă în unitatea de timp; *densitatea* (ρ) este masa unității de volum (volumul fiind lungimea la puterea a 3-a); *energia* (E) este masa înmulțită cu pătratul vitezei etc. Simbolic, se scrie:

$$|V| = \frac{|L|}{|T|}; \quad |\rho| = \frac{|M|}{|L|^3}; \quad |E| = |M| \cdot \left| \frac{L}{T} \right|^2$$

unde barele verticale arată că este vorba de o relație între naturile mărimilor fizice implicate și nu de o relație nu-

merică. Sistemul de unități de măsură nu contează și se poate scrie:

|dolari| = |liră| = |marcă| = |franc| = |rublă| = |leu| = etc., sau

|yard| = |picior| = |metru| = |arșină| = |an-lumină| = etc.

În fizica clasică, lungimea, timpul și masa (sau, mai puțin corect, greutatea) au fost alese, pe temeiuri antropomorfe, adică pe baza unor noțiuni pe care oamenii le întâlnesc în viața de toate zilele. („Este la 5 km de aici”; „Mă întorc peste o oră”; „Dă-mi trei kg de pulpă tocată.”) Nu este însă necesar să se aleagă neapărat *aceste* trei mărimi, oricare *alte* trei mărimi putând servi drept mărimi fundamentale, cu condiția ca ele să fie independente una de alta, de exemplu, intensitatea curentului electric (amperul), puterea unui motor (calul putere) și intensitatea luminoasă (lumânarea standard). Totuși, construind o teorie coerentă a tuturor fenomenelor fizice, este rațional să se aleagă cele trei mărimi fundamentale astfel ca fiecare din ele să domine cîte un sector vast al fizicii, iar celelalte mărimi să le exprimăm cu ajutorul lor. Care anume mărimi ar trebui să facă parte din acest trio?

Fără îndoială, una din ele ar trebui să fie viteza luminii în vid¹(c), care guvernează tot domeniul electrodinamicii și al teoriei relativității. De fapt, dacă se presupune că lumina se propagă cu viteza infinită ($c = \infty$), toată teoria lui Einstein se reduce la mecanica clasică a lui Isaac Newton.

Un alt membru al acestui Trio Universal este, desigur, cuanta de acțiune (h), care guvernează toate fenomenele atomice. Dacă se presupune $h = 0$, revenim la mecanica newtoniană. Marele merit al lui Dirac constă în faptul că a reușit să unească relativitatea cu teoriile cuantice și, în ecuațiile sale, c și h ocupă poziții similare, de același rang.

¹ Începînd cu acest aliniat, se trece direct de la natura mărimii care urmează să fie aleasă, la natura și unitatea de măsură a acesteia (respectiv de la *viteză*, la *viteza luminii*). În limba engleză acest lucru se face pe nesimțite, ambele mărimi fiind exprimate prin același cuvînt — „unit”. Prin urmare, esențială este alegerea anumitor trei mărimi fundamentale. — *N.T.*

Care este însă cea de a treia constantă universală necesară pentru a completa sistemul fizicii teoretice? Una din augustele candidate este, desigur, constanta gravitațională a lui Newton. O examinare mai atentă însă, pare să indice că această constantă nu e prea potrivită pentru a colabora cu celelalte două la explicarea fenomenelor atomice și nucleare. Forțele gravitaționale sînt foarte importante în astronomie, ele explicînd mișcările planetelor, stelelor și ale galaxiilor. În lumea noastră însă, a dimensiunilor umane, atracția gravitațională dintre corpurile materiale este neglijabil de mică și ar fi foarte surprinzător ca două mere, așezate pe o masă la cîțiva centimetri unul de altul, să se rostogolească unul spre celălalt, minate de atracția newtoniană. Atracția gravitațională dintre două corpuri de mărime normală poate fi măsurată numai cu ajutorul unor instrumente extrem de sensibile.² În lumea atomică, forțele gravitaționale sînt complet neînsemnate, ele fiind de circa 10^{50} ori mai mici ca cele electrice și magnetice! Dirac a sugerat cîndva ideea că „constanta gravitațională” a lui Newton nu este realmente o constantă, ci o variabilă care descrește proporțional cu vîrsta Universului. Și s-ar putea foarte bine să aibă dreptate.

Atunci? Care constantă universală va ocupa al treilea fotoliu? Am putea foarte bine proceda ca vechii filozofi greci, primii care au conceput ideea de atom: cea mai mică cantitate de materie. În cartea sa *Analiza Materiei*³, Bertrand Russell scrie: „Am putea presupune, după cum a sugerat cîndva Henry Poincaré și după cum, probabil credea și Pitagora, că spațiul și timpul sînt granulare, nu continue, ceea ce înseamnă că distanța dintre două particule, ca și timpul scurs între două evenimente sînt totdeauna multipli întregi ai unor cantități determinate. Continuitatea — în percepție — a proceselor fizice nu constituie dovada unei continuități obiective”.

În cartea sa *Principiile fizice ale teoriei cuantice*,⁴ Werner Heisenberg scria:

„Deși, în principiu, este posibil ca prin rafinarea aparatelor de măsură, să se micșoreze nelimitat intervalele de spațiu și

² Vezi *Gravitația*, de G. GAMOW, publicată în 1962 în aceeași colecție. (În românește, în Ed. Științifică, 1966) — N.T.

³ Editura Dover, New-York, 1954, p. 235.

⁴ University of Chicago Press, Chicago, 1930, p. 48.

timp, totuși, pentru esența discuției despre conceptele teoriei ondulatorii este avantajos să se introducă valori finite pentru intervalele de spațiu și timp implicate în măsurări și să se treacă la limita zero ($\Delta x \rightarrow 0$; $\Delta t \rightarrow 0$) abia la sfârșitul calculelor. Probabil că evoluția ulterioară a teoriei cuantice va arăta că limita zero pentru astfel de intervale este o abstracție lipsită de sens fizic. Totuși, pentru moment, se pare că nu există motive ca să se impună vreo limitare“.

Totuși, după șase ani, Heisenberg și-a schimbat părerea în ceea ce privește cele 14 cuvinte care urmează după „totuși“ din fraza citată mai sus și a sugerat ideea că „divergențele“ care apar în diferitele cimpuri din teoria cuantelor, ar putea fi eliminate prin introducerea unei lungimi elementare, de ordinul a 10^{-13} cm.

Ce înseamnă cuvântul „divergență“? În matematică, acest termen se referă la „seriile infinite“, adică la acele șiruri nesfârșite de numere care se adună. De exemplu, putem scrie:

$1+2+3+4+5$ (ș.a.m.d., pînă la infinit).

Evident, rezultatul însumării va fi infinit. Dar cum stau lucrurile cu seria: $1+1/2+1/3+1/4+1/5+$ (ș.a.m.d., pînă la infinit)? Se poate arăta că însumarea duce la infinit sau, după cum spun matematicienii, seria este „divergentă“. Pe de altă parte, seria:

$1+1/1!+1/2!+1/3!+1/4!+1/5!+$ (ș.a.m.d., pînă la infinit). În care $n!$ înseamnă produsul tuturor numerelor întregi de la 1 la n , este convergentă și suma ei este 2,3026... În mod similar, seria:

$1-1/3!+1/5!-1/7!+$ (ș.a.m.d. pînă la infinit) este convergentă și are suma zero.

Rezultatele calculelor efectuate în fizica teoretică sînt și ele deseori prezentate sub formă de serii infinite. Dacă seria este convergentă, așa cum se întîmplă de regulă, atunci avem un răspuns clar și o valoare bine definită pentru mărimea fizică calculată. Dar, dacă seria este divergentă, rezultatul devine lipsit de sens, deoarece conduce la o valoare infinită a mărimii calculate. Să considerăm problema masei electro-

nului, care a fost unul din primele exemple de astfel de divergențe. Dacă ne reprezentăm electronul ca o mică sferă de rază r_0 , încărcată cu sarcina electrică $e = 4,80 \times 10^{-10}$ unități electrostatice, electrostatica clasică ne arată că energia cîmpului electric înconjurător este $\frac{1}{2} \frac{e^2}{r_0}$. Conform

legii lui Einstein a echivalenței între masă și energie, masa acestui cîmp este $\frac{1}{2} \frac{e^2}{r_0 c^2}$. Deoarece această masă nu trebuie să depășească masa observată, m_0 , a electronului ($0,9 \times 10^{-27}$ g), rezultă

$$\frac{e^2}{2r_0 c^2} \leq m_0 \quad \text{sau} \quad r_0 \geq \frac{e^2}{2m_0 c^2} = 2,82 \times 10^{-13} \text{ cm.}$$

Pe de altă parte, există motive teoretice temeinice să se presupună că electronul este o sarcină punctiformă. Dar dacă presupunem că electronul este o sarcină punctiformă ($r_0 = 0$) masa cîmpului electric înconjurător devine infinită! Contradicții similare au apărut în număr mare, pe tot parcursul dezvoltării fizicii particulelor și totdeauna se ajungea la rezultate divergente (infinite) dacă nu se „tăia” seria matematică infinită rezultată din calcul la un anumit termen al ei, deși nu exista nici un temei care să justifice această operație. Pauli a numit în glumă acest procedeu — fizica retezării, („Die Abschneidungsphysik”). Semnificativ era însă faptul că tăierea aceasta trebuia făcută totdeauna la distanțe de ordinul a 10^{-13} cm. Cînd, într-o epocă mai recentă, s-a putut măsura cu suficientă precizie raza de acțiune a forțelor care acționează între nucleoni, s-a găsit că aceasta este $2,8 \times 10^{-13}$ cm, adică exact așa-numita „rază clasică a electronului”, calculată pe baza ipotezei că masa electronului se datorează exclusiv cîmpului său electrostatic. Devine tot mai evident că există o limită inferioară a distanțelor, o lungime elementară λ , anticipată de Pitagora, Henri Poincaré, Bertrand Russell, Werner Heisenberg și alții, lungime care este fundamentală în fizică. Așa cum nici o viteză fizică nu poate depăși viteza luminii, c , și nici o acțiune mecanică nu poate fi mai mică decît acțiunea elementară h , tot așa nici o distanță nu poate fi mai mică decît λ și nici un interval de timp nu poate fi mai mic decît durata elementară, λ/c . Cînd vom ști cum trebuie

introduse λ (și λ/c) în ecuațiile fundamentale ale fizicii teoretice, vom putea afirma cu mândrie: „Acum am înțeles, în fine, cum acționează materia și energia“!

Dar, după cei 30 de ani „grași“ de la începutul secolului nostru, ne tirăm acum prin ani slabi și sterpi, cu speranța că anii viitori vor fi mai norocoși. În ciuda eforturilor veteranilor — Pauli, Heisenberg și alții — și ale celor din generația mai tină — Feynmann, Schwinger, Gell-Mann și alții — comparativ cu primele trei decenii, în ultimii 30 de ani fizica teoretică a progresat foarte puțin. Situația actuală cred că poate fi cel mai bine caracterizată prin cele spuse într-o scrisoare trimisă autorului acestei cărți, de către Pauli, scrisoare în care acesta descria tentativa întreprinsă împreună cu Heisenberg de a explica masele diferitelor particule elementare, care, pe vremea aceea, se înmulțiseră ca iepurii. Iată un extras din această scrisoare, în care cea mai mare parte (nepublicată aici) se referă la problemele fundamentale ale biologiei: (fig. 31)

UNIVERSITATEA DIN CALIFORNIA

Departamentul de fizică
Berkeley 4, California

1 martie 1958

Dragă Gamow,

Îți mulțumesc pentru scrisoarea din 21 februarie. După părerea mea, treaba de care ne ocupăm, Heisenberg și cu mine, este atât de complicată numai pentru că noi n-am înțeles-o suficient de bine. (Nu avem încă un „articol“, dar un „preprint“, încă nefinisat pentru publicare, va putea fi trimis în curând fizicienilor, pentru a le satisface curiozitatea și pentru a preintimpina zvonurile senzaționale.) În acest sens anexez comentariul meu asupra comunicării făcute de

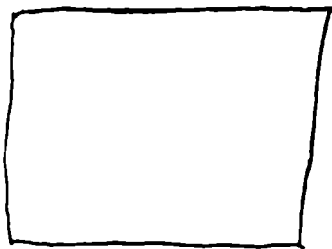
March 1st, 1938

Dear Gannow,

Thanks for your letter of Feb. 24th. The stuff of Heisenberg and me is, as I believe, only so complicated for the reason, that we both have not yet understood it sufficiently. (There is no "paper" yet; but some other preprint, not yet determined for the publication, may be sent to physicists soon, to satisfy their curiosity and to prevent wild rumors.) In this sense you find enclosed my comment on Heisenberg's radio advertisement. (Please don't publish it in the press, but please do show it to other physicists and make it popular among them.)

Comment on Heisenberg's radio advertisement:

"This is to show the world, that I can paint like Titian."

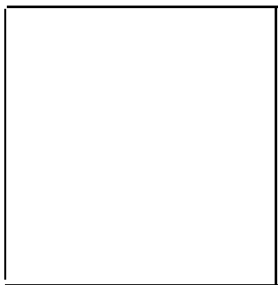


Only technical details are missing.

V. Pauli

FIG. 31.
Scrisoarea lui Pauli.

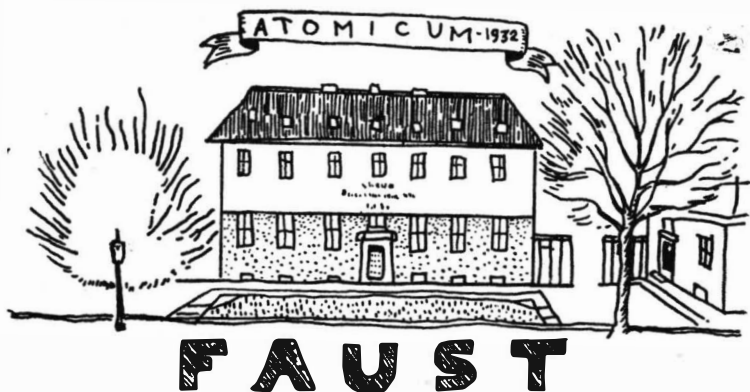
Heisenberg la radio. (Te rog să nu-l publici în presă, arată-l însă altor fizicieni și popularizează-l printre ei.)
Comentariul asupra anunțului lui Heisenberg la radio:
„Iată dovada că pot picta ca Tizian:



Lipsesc numai detaliile tehnice.“

V. Pauli

Au trecut 7 ani de cind a fost scrisă această scrisoare, s-au publicat sute de articole asupra problemei particulelor elementare și totuși ne aflăm încă în întuneric și nesiguranță. Să sperăm că într-un deceniu sau două, sau măcar pînă la începutul secolului al XXI-lea, actualii ani secetoși ai fizicii teoretice se vor sfîrși într-o jerbă de noi idei revoluționare, similare cu cele care au anunțat triumfal începutul secolului al XX-lea.



O povestire

Scenariul după: J.W. von Goethe

Producător: Echipa de lucru a „Institutului de Fizică Teoretică”; Copenhaga



Motto: Nu ca să critic, ci... N. Bohr

PROLOG

ÎN TRE CER ȘI IAD

PREFAȚĂ. CITEVA REMARCI

Primele decenii ale secolului actual au fost martorele dezvoltării cu prioritate a teoriei cuantice a atomului și în această epocă toate drumurile teoreticienilor, de toate naționalitățile, au dus nu la Roma, ci la Copenhaga, orașul în care s-a născut și a lucrat Niels Bohr, primul care a elaborat un model corect al atomului. Devenise tradiție ca la sfârșitul fiecărei conferințe de primăvară de la Blegdamsvej¹ 15 (adresa de pe atunci a Institutului de Fizică Teoretică al lui Bohr) să se facă un spectacol pe tema celor mai recente dezvoltări din fizică.

Conferința din 1932, care a coincis cu cea de a zecea aniversare a Institutului lui Bohr, a avut loc imediat după descoperirea de către fizicianul englez James Chadwick a unei particule noi, *avînd aceeași masă ca și protonul, dar lipsită de sarcină electronică*. Chadwick a numit-o *neutron*, nume care a devenit azi familiar tuturor celor care se interesează de fizica nucleară, denumită în mod curent oarecum incorect „energie atomică”

În terminologie a avut însă loc o oarecare încurcătură. Cu puțini ani înainte, Wolfgang Pauli folosisese același ter-

¹ Se pronunță „Blii-dams-vii”.

men pentru a desemna o particulă ipotetică care *nu avea nici mazăre nici sarcină* și care era necesară, după părerea sa, pentru a explica violarea legii de conservare a energiei, violare observată experimental în procesul dezintegrării beta. „Neutronul lui Pauli“ a format obiectul unor discuții aprinse între fizicieni, acestea au fost însă în exclusivitate orale sau în corespondențe particulare și numele nu a fost niciodată „înregistrat“ prin apariția lui în vreo publicație oarecare. Și astfel, în 1932, când Chadwick a anunțat descoperirea sa, a unui neutron greu, într-un articol din „Nature“, numele neutronului ușor al lui Pauli trebuia schimbat. Enrico Fermi a propus să fie numit *neutrino*, care în limba italiană înseamnă un neutron mic.

În traducerea care urmează, numele din textul original pentru particula lui Pauli „neutron“ a fost schimbat cu numele actual „neutrino“, a cărui existență la vremea aceea nu fusese încă demonstrată. Mulți fizicieni și, în special Paul Ehrenfest, din Leida, erau foarte sceptici cu privire la neutrino-ul ipotetic al lui Pauli și de-abia în 1955 existența acestuia a fost demonstrată în mod indubitabil prin experiențele lui Fred Reines și Cloyd Cowan, de la Laboratorul Științific din Los Alamos.

Paginile care urmează sînt transcrierea unei piese care a fost scrisă și realizată de cîțiva discipoli de-ai lui Bohr și jucată la întîlnirea din primăvara anului 1932...

Tema acestei lucrări dramatice o constituie încercarea lui Pauli (*Mefisto*) de a vinde scepticului Ehrenfest (*Faust*) ideea neutrino-ului fără greutate (*Gretchen*). §

Reproducem în această carte *Faust*-ul de la Blegdamsvej, în traducerea englezească a lui Barbara Gamow, ca pe un important document al acelor ani agitați de dezvoltare a fizicii. Autorii și actorii preferă să rămînă anonimi, cu excepția lui J.W. von Goethe. Ținînd seama că nu am reușit să aflăm autorul sau autorii originali, precum și scenografiile originale, sugerăm editorului să retragă o parte corespunzătoare a drepturilor de autor, care urmează a fi plătite, și să le țină în custodie timp de doi sau trei ani, cu speranța că publicarea cărții va determina descoperirea autorului și (sau) a scenografilor. Dacă aceasta nu se va întîmpla, suma ar putea fi remisă Bibliotecii Institutului, pentru cumpărarea de noi cărți.

Exprimăm mulțumirile noastre Profesorului Max Delbrück pentru ajutorul dat la interpretarea unor pasaje ale piesei.

G.G.

În versiunea germană a acestui *Faust* fizic, rimele și ritmul originalului lui Goethe au fost urmărite îndeaproape, dar nu întocmai (a se vedea pasajele corespunzătoare din *Faust*). Și în versiunea aceasta, engleză, au fost admise o serie de licențe poetice, astfel că ea se amplasează undeva între cele două. Din păcate, unele din versurile originalului care au fost utilizate ad litteram în textul versiunii germane a *Faust*-ului fizic nu au putut fi păstrate și în versiunea engleză. De asemenea, a fost necesar să se încerce să se găsească pentru unele jocuri de cuvinte din germană, echivalente engleze. Unele din pasajele în proză în germană au fost traduse în engleză în versuri și apar ca cuvântări ale Maestrului de ceremonii. S-a făcut aceasta, în intenția de a ușura reprezentarea pe scenă a acestui *Faust* fizic.

De-a lungul piesei are loc o amuzantă confuzie a identității personajelor: despre Gretchen se vorbește uneori ca despre Gretchen, alteori ca despre Neutrino; despre Faust uneori ca despre Faust, alteori ca despre Ehrenfest. Aceasta nu face însă decât să mărească veselia și nimeni nu se simte supărat.

În legătură cu aceasta, dacă piesa ar urma să fie jucată, cred că ar fi bine ca personajele minore (fie ele persoane sau concepte) să poarte plăci distinctive, care să indice cine sînt: „Slater“, „Darwin“, „Monopolul“, „Semnul fals“ etc. În caz contrar ar rezulta pentru auditoriu o harababură de nedescurcat.

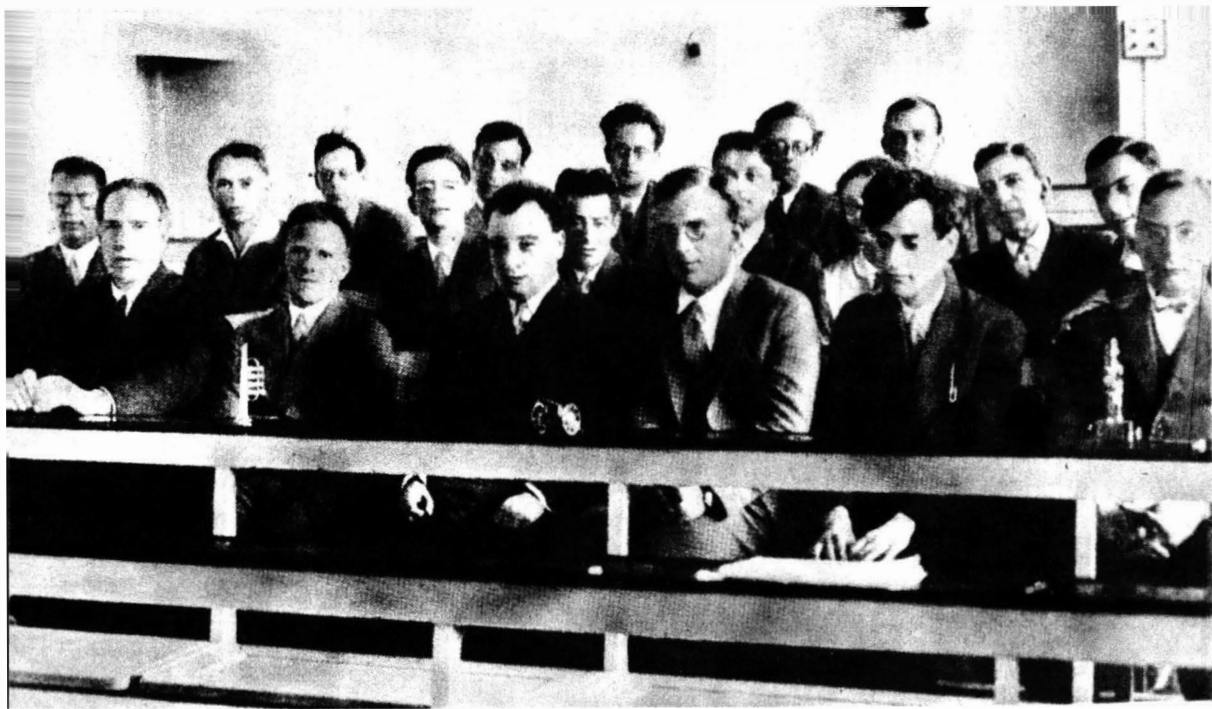
B.G.

PE CINE REPREZINTĂ PERSONAJELE

{Notă: Maestrul de ceremonii este jucat de Max Delbrück, fizician german}

Arhanghelul Eddington	A. Eddington, astronom englez
Arhanghelul Jeans	J. Jeans, astronom englez
Arhanghelul Milne	E.A. Milne, astronom englez
Mefisto	W. Pauli, fizician german
Domnul	Niels Bohr, fizician danez
Cetele cerești	„Ceilalți“
Faust	P. Ehrenfest, fizician olandez
Gretchen (Margareta)	Neutrino
Oppie	R. Oppenheimer, fizician american
Un om înalt ¹	R.C. Tolman, fizician american
Millikan-Ariel	R.A. Millikan, fizician american
Landau (Dau)	L. Landau, fizician rus
Gamow	G. Gamow, fizician rus
Slater	J.C. Slater, fizician american
Dirac	P.A.M. Dirac, fizician englez
Darwin	C. Darwin, fizician englez
Fowler	R.H. Fowler, fizician englez
Patru vrăjitoare	Invarianta de calibrare, Constanta structurii fine, Energia negativă, Singularitatea

¹ Joc de cuvinte: a tall man = Tolman. — N.T.



Conferință tipică de la Copenhaga în 1930. În rîndul întîi: Klein, Bohr, Heisenberg, Pauli, Gamow, Landau, Kramers

Fotograful binevoitor
Wagner
Corul mistic

Un fotograf binevoitor
J. Chadwick, fizician englez
Oricine ştie să cinte

CEI TREI ARHANGHELI, DOMNUL, CETELE CEREȘTI ȘI MEFISTO*



ARHANGHELUL EDDINGTON: După cum bine știu, Soarelui îi este hărăzit să strălucească în sfere politropice¹; drumul lui, de mult predestinat, *ale mele teorii* în întregime le confirmă. Slavă teoriei proclamată de Lemaître² (pe care nimeni din noi n-o înțelege)! Și ca și-n dimineața Creației, lucrările strălucitoare sînt surprinzătoare și grandioase.

ARHANGHELUL JEANS: Și stelele duble, mereu rotindu-se și-n deplasare rapidă, apar la iveală strălucind în zbor, alternînd străluciri de stele uriașe cu noaptea eclipsei totale. Fluide ideale, fierbinți și rotindu-se, capătă prin fisiune formă de pară³. *Ale mele sînt teoriile* care cîștigă! Atomul nu poate să modifice regulile.

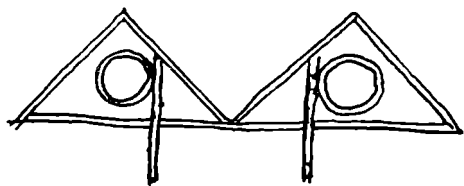
ARHANGHELUL MILNE: Furtunile se declanșează libere în competiție (de altfel ca și „Monthly Notices“⁴!) Și ard, cu violentă ambiție, importante noutăți să prevadă. La o temperatură de 10 la puterea a 7-a gazul degenerează în flacără, permițîndu-ne în numele lui Fermi⁵ ora noastră strălucitoare de zbor maxim independent.

* Trimiterile din textul ce urmează, au explicațiile la sfîrșit. — N.R.

TOȚI TREI: Viziunea ne provoacă exaltare (deși nimeni din noi n-o poate înțelege). Și, ca și-n ziua Publicării, Lucrările strălucitoare sînt surprinzătoare și grandioase.



MEFISTO: (sărind în față) Deoarece, o *Doamne*, ai socotit că-i de cuviință să vii însuși să ne vizitezi și să ne-nveți cum se comportă toate, și deoarece se pare că-mi acorzi o oarecare preferință, ei bine, iată-mă aici (întorcîndu-se spre asistență) printre sclavi. Despre stele și despre universuri nimic nu am a spune juriului; tot ce știu e cum se jăluie popoarele. După mine, teoria îi plină de vorbe (goale) și de furii, deși voi aici din nou sinteți în extaz, fiind de acord cu puncte de vedere care se sparg ca baloanele de săpun și băgîndu-vă nasul în tot felul de dificultăți.



DOMNUL: Dar trebuie oare să intrerupi aceste sărbători tocmai pentru a te plinge, o tu Prinț al Demonilor? Oare niciodată nu te-a pătruns cum trebuie Fizica Modernă?

MEFISTO: Nu, *Doamne*! Compățimesc Fizica pentru starea-i de plîns, și în zilele-mi triste ăst fapt mă chinue și mă mihnește adînc. Nu-i de mirare că mă jălui — dar cine oare îmi dă crezare?

DOMNUL: Îl cunoști oare pe acest *Ehrenfest*?...

MEFISTO: Criticul?? (Apare o imagine a lui Ehrenfest.)



DOMNUL: Cavalerul meu.

MEFISTO: Cavalerul, scutierul și vasalul vostru. Care vi-e rămășagul? Vă previn, veți pierde sigur, dacă-mi dați posibilitatea să vă ispitesc cavalerul și să-l duc departe pe drumul greșit.

DOMNUL: O, e într-adevăr îngrozitor! Da, trebuie să spun că da ... *Jah, muss ich sagen*⁸ ... Are loc un faliment fundamental al conceptelor clasice — o mlaștină. O remarcă particulară — dar ia-o confidențial — ce ai de gînd să propui să facem cu *Masa*?

MEFISTO: Cu masa? Eh, să uităm de ea!

DOMNUL: Dar ... Dar asta-i tare in-te-re-sant. Totuși s-o încercăm ...

MEFISTO: O, pălăvrăgeală! Ce fel de prostii vorbești azi! Fiți calm.

DOMNUL: Dar ... dar ... dar ... dar ...

MEFISTO: E ipoteza mea!

DOMNUL: Dar bine *Pauli*, Pauli, noi practic sîntem de acord. Nu-i nici o ne-nțelegere, pentru asta, garantez! *Natürlich, Ich bin einig**. Putem desigur renunța la Masă, la Sarcină, asta-i cu totul altceva —; aș, Sarcina *trebuie* să rămînă!

MEFISTO: Ce prostie temperamentală! De ce nu am scăpa de Sarcină?

DOMNUL: Înțeleg pe deplin, dar *maa jeg spørge*, prietene⁹.

MEFISTO: Termină!

DOMNUL: Dar bine Pauli, ai să mă ascuți oare pînă la capăt? Dacă Masa și Sarcina sînt trimise la plimbare, ce-ți mai rămîne oare în general?

MEFISTO: Dragă omule, e doar elementar! Mă întrebi ce oare rămîne? De ce să mă jignești, *Neutrino-ul*! Deșteaptă-te și folosește-ți mintea!

(Pauză. Amîndoi pășesc încoace și-ncolo).

DOMNUL: Nu spun asta ca să critic, ci mai degrabă pentru a învăța¹⁰... Acum trebuie însă să te părăsesc. La revedere! Mă voi reîntoarce! (iese).



MEFISTO: Din cînd în cînd, eu pe Bătrînul bucuros îl vîd. Și-mi place să mă port cu el frumos — pe cît sînt eu în stare de frumos. E fermecător și este falnic, o rușine-ar fi să te porți cu el nedrept — și imaginați-vă! — vorbește întotdeauna atît de omeneste cu Pauli. (Iese).

* Joc de cuvinte: Desigur, sînt de acord și: Desigur, sînt unic în felul meu! — *N. T.*

PARTEA ÎNȚI

ODAIA DE STUDIU A LUI FAUST



FAUST: Am învățat — vai — Chimia Valențelor, Tecria Grupurilor și a Cîmpului Electric, precum și Teoria Transformărilor așa cum a fost ea revelată de Sophus Lie în una mie opt sute nouăzeci și trei. Și totuși, cu toată știința mea, nu-s mai înțelept ca mai înainte. Magistru mi se spune și-s Doctor. În sus și în jos, împrejur și deasupra, discipolii au fost ghidați de acest biet rătăcitor Faust, clown distrat; ei și-au spart capul cu Fizica, precum mi s-a întîmplat și mie. Și totuși, mă simt mai bine decît trăsniții, Grangurii, maimuțele, „leprele“. *Toate* dubiile și scrupulele mă asaltează; și de Pauli mă tem ca de Dracul însuși. Apuc radiera ca un elev ieșit din minți, înainte ca magicele X-erii¹¹ să dispară, fiindcă ceea ce este scris alb pe negru e apt pentru a fi acceptat și just. O, Doamne Sfinte! Mai pot încă să-i învăț cîte ceva. Nu-i am aici alături pe Guth sau pe Breit¹² dar pot folosi aptitudinea lor de predicatori pentru a răspîndi verificata evanghelie — *bine și-n larg*. Nici măcar Hund sau un ciine n-ar putea să poarte sarcinami¹³; eu sînt Criticul, trist și neiubit. (Mefisto intră ca un trăsnet, îmbrăcat ca un negustor ambulant.) Ce-i zgomotul acesta?



MEFISTO: La dispoziția dumneavoastră, Domnule!

FAUST: Drept cine mă iei? Drept client?

MEFISTO: Te știam primitor și civilizat ... Teoriile acestea sînt astăzi pline de greșeli. De aceea vreau să-ți prezint ceva mai de calitate, cu care ai putea da foc la lume: „Dansul Vițelului de Aur“ — caleidoscopic — pe nume *Teoria Radiației*.



(Canon cîntat de toți)

Born — Heisenberg

Heisenberg — Pauli

Pauli — Jordan

Jordan — Wigner

Wigner — Weisskopf

Weisskopf — Born

Born — Heisenberg¹⁴ (etc.)

(etc.)

MEFISTO: Ei sînt ai mei, ai mei, ca din osul meu. Ascultă-i cum cu vitejie și cu gust, precoci, ei împart sfaturi. Aici liniile se lătesc peste vasta întindere a cîmpului de unde. (Maestrul de ceremonii protestează prin gesturi. *Mefisto*

repetă). Aici liniile se lătesc datorită lipsei de consistență a cîmpului de unde.

FAUST: Ajunge. Nu mă vei seduce. Sînt vindecat. Niciodată nu mă voi atinge de reprinturile tale, fii sigur.

MEFISTO: Sînt foarte bucuros (aparte):

Raționamentul lui are măduvă. Primul om cu care am ce discuta! (etalindu-și mărfurile) O Psi — Psi — *Stern*?¹⁵

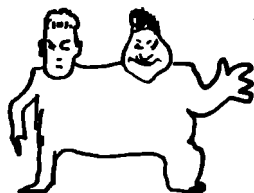
FAUST: Nu cumpăr!

MEFISTO: O Psi — Psi — *Gerlach*?

FAUST: Nu cumpăr!

MEFISTO: Electrodinamică.

FAUST: Nu cumpăr!



MEFISTO: De *Heisenberg* — *Pauli*

FAUST: Nu cumpăr!

MEFISTO: Cu energie proprie infinită?

FAUST: Nu cumpăr!

MEFISTO: Electrodinamică?

FAUST: Nu cumpăr!

MEFISTO: De *Dirac*?

FAUST: Nu cumpăr!



MEFISTO: Cu energie proprie infinită?

FAUST: Aceeași veche poveste!

MEFISTO: Trebuie să-ți arăt atunci ceva ce-i unicat!

FAUST: N-ai să mă seduci, oricît de gingaș ai vorbi! Dacă vreodată spune-voi vreunei teorii: „Oh, cit ești de frumoasă“ și: „Stai, o, nu pleca!“ putea-vei să mă pui atunci în lanțuri și să-mi spui adio — fi-voi bucuros atunci să plec, tîrindu-mă, și să mor.

MEFISTO: Păzește-te doar de Rațiune și de Știință, aflate în alianță ireverențioasă și care sînt ale omului cele mai mari forțe. Singur te-ai lăsat prins, uimit de puterea-i de vrăjitoare, de toate ispitele Cimpului Cuantic. Ascultă! Deoarece acum obstacolele scad, vei face cunoștință cu frumoasa Neutrino, care ți-e predestinată!

GRETCHEN: (intră și cîntă către Faust. Melodia: *Gretchen la roata de tors*, de Schubert).



Masa mi-e zero, și sarcina-i la fel.

Tu-mi ești alesul, numele-mi e *Neutrino*.

Eu îți sînt predestinată, eu îți sînt soluția,

Închis este drumul dacă eu lipsesc.

Razele beta sînt totdeauna în compania mea¹⁶

Spinul N-ului¹⁷ este de neînțeles dacă nu sînt și eu acolo.



Masa mi-e zero și sarcina-i la fel, tu ești alesul meu,
Numele-mi e *Neutrino*.

Spiritu-mi spre tine, iubite, se îndreaptă.

Biata-mi inimă după tine doar tinjește.

Sufletu-mi aprins de dragoste de tine trebuie cîștigat.

Nu pot să-mi stăpinesc rotația (spinul) tremurătoare.

Masa mi-e zero și sarcina-i la fel, tu ești alesul meu,
Numele-mi e *Neutrino*.

(Ies cu toții)

BARUL CLANDESTIN AL DOAMNEI ANN ARBOR¹⁸

(cunoscut sub numele de „Taverna lui Auerbach“)

(Fizicienii americani stau triști la Bar).



MEFISTO: (apărind din spatele barului) Nu ride nimeni? Și nimeni nu bea? *Eu am* să vă învăț Fizică într-o clipită ...



(le face cu ochiul, exagerat și semnificativ, fizicienilor). Rușine să vă fie că de uimire stați înghețați, când de regulă sinteți cu toții plini de foc!

OPPIE: (înghițind — Njum! Njum! — înainte de a vorbi). A ta e vina! N-ai adus un singur cuvânt măcar de-ncurajare — nici o noutate, nici o X-erie. Pfui!

MEFISTO: (prezentind-o pe Gretchen) Uitați-vă la amindouă! (aplauze prietenoase și tumult general).



UN OM ÎNALT: O signorina bine făcută și atrăgătoare ... (către Mefisto) spune-mi, ai fost oare la Pasadena?

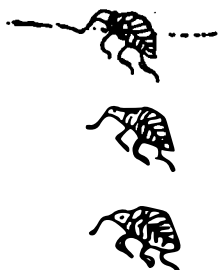
MEFISTO: Da, cu Einstein. Vă trimite salutări în refugiul vostru acest *wunder-bar* al Doamnei Annie Arbor.

UN OM ÎNALT: Einstein! Cu ale lui curbe! Cu ale lui cimpuri! Cu întregul lui cerc!

MEFISTO: (cintă) Un *Monarh*, cu drag iubit, are drept fiu un Purice¹⁹, mai mult sau mai puțin asemănător cu *Gravee-táy-shee-un-ul*. Monarhul recurge la *Mayer*²⁰ și Mayer spune: „Pentru a ne asigura, am să-i fac tensori²¹, Sire, cu curbura de joncă“. Îmbrăcat ca un dandy, Puricele a fost



apoi prezentat. Oamenii îl mâncau ca zahărul candel, atât de dulce fu făcut. Puricele cresc și ulterior i se nascu și Fiul²². Și fiul se luă la întrecere cu tatăl, dar niciodată nu



l-a ajuns. Pe jumătate goi, din bucuria și mândria Berlinului, veneau puricii, numiți de necredincioși „Teorii unifi-

$$\Gamma_{st}^i = \Gamma_{st}^i + \Gamma_{st,r}^i \int \mathcal{E}^r$$

$$\int \mathcal{M}_i \int \mathcal{E}^i d\tau$$


$$\mathcal{G}_{\sqrt{s}}^{is} = 0$$

cate ale cimpului“. Și acum, fizicieni, fiți prevăzători, faceți această lucidă verificare: cînd purici noi sînt nenăscuți, asigurați-vă că sînt bine îmbrăcați.

TOȚI: Beți așa cum sîntem, ne simțim la fel de bine, ca — hic! — cinci sute de scroafe!

FAUST: (cunoscut ca fiind impotriva alcoolului, trece în faţă şi cîntă) (către Mefisto). Te aştepţi să mă fac sănătos în



acest haos, vacarm şi iad? (către Gretchen). Tu Schelet, tu Monstru, aicea sint, îţi recunoşti tu însă domnul şi stăpînul? Ce mă reţine oare? Priveşte, te iau de mîină, şi te sfărim!

GRETCHEN: Faust, Faust presimt o nenorocire!

(Ies cu toţii).

PARTEA A DOUA

UN ȚINUT FERMECĂTOR

(Faust doarme, pe un pat de trandafiri. În dreapta lui un prun. Un vacarm înspăimântător anunță apropierea lui *Millikan-Ariel*).



MILLIKAN-ARIEL: (din înălțimi) Ascultă, o, ascultă cuvintele celor ce freacă (camere Wilson, contori)!²³ Cu tunete, pentru a spiritului ureche, vor apărea acum *Razele Cosmice*! Protonii scîrție și huruie, electronii se rostogolesc și clinchie. Lumina dă năvală — încotro? de unde? *Heisenberg* e foarte supărat²⁴; *Rossi* și *Hoffmann* amîndoi sînt nervoși²⁵ Toate aceste prostii n-au nici un sens!



FAUST: (trezindu-se). O, cimp parfumat de trandafiri, ce sol imbrățișez eu oare? Și de ce-mi pare cunoscut? Se spune că Rosenfeld²⁶ binecuvîntează invariantul de calibrare²⁷. Asta-i ghinda lui. (Apare Maestrul de Ceremonii) (către M.C.): Ce se va juca azi?

M.C.: Noaptea valpurgică, mai întii *Poetic Clasică* și după aceea *Teoretic Cuantică*.

FAUST: Excelent! Sint de acord.

NOAPTEA VALPURGICĂ CLASICĂ

MAESTRUL DE CEREMONII (cu un gest de prezentare): Cea clasică — un potpuriu!



FAUST (se înclină înainte, în așteptare. O lungă pauză arată că nu se întâmplă nimic): Dar nu se întâmplă nimica!

M.C.: Așteaptă, și vei vedea!

FAUST (Așteaptă. Iarăși o lungă pauză și iar nu se întâmplă nimic): Ascultă, Delbrück!...

M.C.: Faust, trebuia să te aștepți că cea Clasică nu va avea nici un efect asupra auditoriului. (Intră *Dirac*).

DIRAC: Așa-i! Așa-i!

FAUST: De ce n-am sări peste asta, și n-am trece la T. (eoria) C. (uantică)?

M.C.: De-ași face astfel, aș greși ca M(aestru) (de) C.(ere-monii), deoarece e necesar ca mai întâi cea Clasică să se termine cum se cuvine.

FAUST: Propun două scări diferite ale timpului pentru aceste Noști valpurgice. După cum am recunoscut, Prima trebuie dată uitării!

DIRAC: Nu-i permis!

FAUST: Propun atunci ca cea Clasică să fie deplasată cu mult înapoi în timp și spațiu.

M.C.: Se aprobă!

NOAPTEA VALPURGICĂ A TEORIEI CUANTICE

(De o parte a scenei, în fund, apar *Domnul* și *Landau*, acesta din urmă legat și cu căluș în gură).



DOMNUL: *Dau*, fii liniștit! ... Da, într-adevăr, singură teorie care e corectă, sau singura care m-ar putea seduce, este ...

LANDAU: Um! Um-um! Um-um! Um-um!

DOMNUL: Nu întrerupe discuția! *Eu voi ține* cuvântarea, *Dau*; vezi, singura regulă corectă empirică este! ...

LANDAU: Um! Um-um! Um-um! Um-um! (De partea cealaltă a scenei, în spate, apare după gratii fața lui *Gamow*).



GAMOW: N-am putut veni la Blegdamsvej (Barieră de potențial prea înaltă!) Această „discuție“ este o păcăleală, Domnul e cel ce-a făcut gluma. Legat și cu căluș, din cap până-n picioare, *Dau* nu poate spune nici „*Niet!*“ nici „*Harașo!*“ M.C. (în mijlocul scenei): Fii atent! *Achtung!* Supraveghează! *Golurile* astea ale lui P. Dirac²⁹, pot să vă agațe într-o secundă și să vă întoarcă pe dos! (El pune un semn „Atenție“).

MONOPOLUL (pășește în față și cîntă): Doi Monopoli se venerau reciproc³⁰ și totul în ei era iubire. Și totuși, niciunul din ei nu se putea întîlni cu fratele său. Dirac era atît de

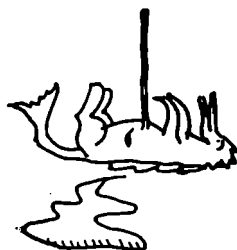
însăpăimintător de sever! (către M.C.). Dar spune-mi —
(Atenție! Uite un goll!) Unde-i oare iubitul meu *Antipol*?



M.C. (aparte): (Un Goll! Piciorul meu! Mai degrabă un crater!) (către *Monopol*) Așteaptă o clipă — iată vine *Slater* (*Slater* intră cu o lance singierindă și cu *Dragonul Grupurilor*)³¹.



M.C. (observind personajele alergind pe scenă): De ce aleargă? De ce se rostogolesc? Cine i-a rănit cu țărșul ăsta singeros? *Dragon al Grupurilor*, cu această lovitură mortală, te-am doborât! Îmbrăcat în solzi de indici este cel ce-a murit, de



Anti-simetrie. Redus la nimic, el zace aici despuiat de rangul său și de masca sa. *Dragon al Grupurilor* cu această lovitură mortală, te-am doborât!
(*Semnul Fals* intră).



SEMNUL FALS³²: Toate teoriile pier sau provoacă dezamăgire. *Semnul* este cel ce vă strică toată plăcerea. Calculul este splendid, și totul e frumos, și totuși, la zenit, își croiește drumul *Semnul*!

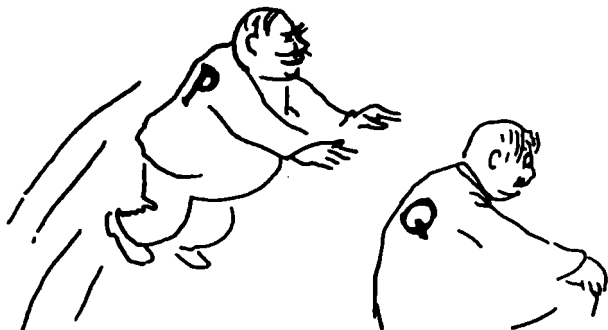


(*Dirac* și *Darwin* sint aduși în față)

M.C.: Uitați-vă, acesta-i veneratul *Caz Mono-dimensional*; îl cheamă *Dirac* — îi recunoașteți figura. De aproape îl urmează *Tri-dimensionalul Darwin*. (*Semnul Fals* face pe grozavul în jurul lui *Dirac* și-l împinge de-o parte. Nuse poate apropia însă de *Darwin*). Uitați-vă la *Semnul Fals*; este contrariat și uimit. Este jignit în mândria lui. El poate să-l manipuleze pe *Dirac*, *Darwin* este însă o nucă prea tare pentru el, fiindcă *Darwin* este pină acum ca o coțofană în cer — el e doar o slabă licărire în ochiul unui fizician. (M.C. ridică o pancartă, pe care o citește).

RELAȚIA DE SCHIMB³³: $PQ - QP = h/2\pi i$

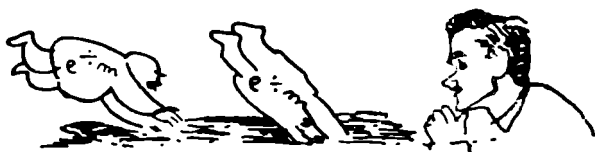
Supravegheați-o! *Darwin* însuși s-a transformat într-un *P*, (*Fowler* intră în scenă) iar *Fowler* — el e *Q*-ul — a sosit. După cum veți vedea, ei explică *Relația* de pe pancartă jucând capra ca nebunii prin toată curtea.



(La fiecare schimb străfulgeră (ca un flash!) semnul „ $h/2\pi i$ “. Între timp se cîntă): Astfel schimbate sint P și Q , o dată și încă o dată. Și peste toate planează $h/2\pi i$, $h/2\pi i$! Ei nicio-



dată nu pot să se astîmpăre, pînă ajung să dispară ca giștele, pînă ajung să dispară ca giștele. Și peste toate planează $h/2\pi i$, $h/2\pi i$! Atenție! Atenție! Acuma li s-a modificat forma



(P și Q suferă acum dureroasa metamorfoză în *Electroni-măgari*³⁴ și cad în unul din Golurile lui Dirac). Iată *Electronii-măgari*. Observați că s-au clătinat și au căzut, datorită lipsei de grijă (stingaci flăcăi!) într-unul din aceste Goluri puse aici drept capcane. (*Spinul Fotonului*, îmbrăcat în veșminte indiene, alunecă de-a lungul scenei, acompaniat de o muzică efemeră).



Din nou atenție! Iată *Spinul Fotonului*³⁵ îmbrăcat cu un fel de *sari* indian și pelerină. (E clar că nici un *Boson*³⁶ modest și respectabil nu va traversa podiumul fără a avea vreun veșmînt pe el!)

(*Dirac* trece în față, urmat de *Patru Femei Cărunte*).

PRIMA: Numele mi-e Invarianta de Calibrare.

A DOUA: Sint faimoasa *Constantă a Structurii fine*³⁷.

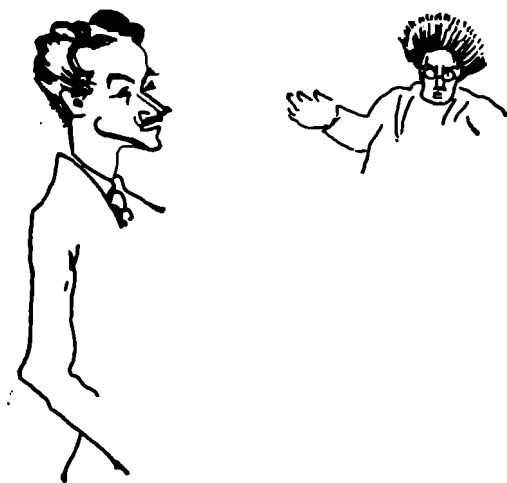
A TREIA: Eu sint *Energia Negativă*³⁸.

A PATRA (către A Treia): Fii atentă la gramatică, Număr Trei! (către celelalte). O, suratelor, voi nu puteți și n-aveți voie să intrați în calcul. Dar, în cele din urmă, eu acolo voi fi, deoarece eu sint *Singularitatea*!³⁹ (*Cele Patru* trec la marginea scenei, ca ulterior să se amestece din nou).

FAUST: Patru am văzut venind, una am văzut ducindu-se; și ce-au încercat să spună, nu știu. Aerul a devenit atit de plin de umbre și stafii încît am face bine să ne spînzurăm de perucile noastre.

DIRAC: Se aude un croncănit de pasăre ciudată. Ce prevestește oare? Nenorocire! Teoriile noastre, gentlemen, au intrat în amok. Trebuie să revenim la 1926⁴⁰; tot ce-am făcut de atunci e bun doar de a fi ars.

FAUST: Și oare nimica nu va fi generat astăzi?



DIRAC (către cele *Patru Femei Cărunte*): Tu singularitate, *dispari*!

A PATRA: Aici mi-e locul și, te rog, *nu țipa*!

DIRAC: O, lelițelor, am să vă elimin prin magia mea!

A PATRA: Nu sînt eu oare în cîmpuri Proprii? Radiația nu mă conține oare? Forma mereu mi-o schimb, puterea însă mi-e așa de mare, că nimeni nu mă poate înlăntui. Pe traiectorie, ca și pe undă, prezentă sînt printre sclavii înspăimîntați, totdeauna găsită, deși niciodată căutată, blestemată chiar înainte de a fi prinsă.

DIRAC: Nu văd unde vrei să ajungi! (Iese, alungat de *Singularitate*).

M.C.: (către spatele lui Dirac): Ai s-o afli curînd — femeia asta te va alunga pînă pe Lună! (către auditoriu) Numai dacă nu-l vor salva picioarele lui lungi! Aveți dreptul la trei încercări! Va evada oare?

(Apare *Mefisto*. Cineva bate la ușă. Un *fotograf binevoitor* aruncă o privire întrebătoare).



MEFISTO: Avansează, avansează! Intră, intră! Tu bătăran cu pantaloni lăbărțați, tu, cu placă și film și țacănît și vacarm! (Arătîndu-l pe *Faust*). El se zbircește fără tine.

FAUST (extrem de agitat, pozează pentru fotografii presei): În acest moment solemn lăsați-mă să spun: „Ești atîta de frumoasă — O, rămi!” o urmă de-a mea va persista printre cei Mari, în analele Celei de a Patra Stări. Anticipînd o soartă așa de blîndă, mă bucur acum de momentul care-mi aparține!

(Moare, iar corpul lui este scos de Presă).

MEFISTO: Nici o bucurie nu-i era suficientă; nici un noroc nu l-a liniștit. Formele schimbătoare, pe care le-a curtat, nu l-au plăcut niciodată. Sărmanul se agăța de acelea care-l evitau. Acum toate s-au terminat. Cum l-a ajutat Știința lui?!

M.C. (către aparatul fotografului): Afară, lumină dominantă! — dezvoltare de magneziu, revărsind nori cu fulgere, eul deflorindu-l, alterindu-l pe Unul, orbindu-l pe Altul, nu ne mai deranja!

FINAL

AFOTEOZA ADEVĂRATULUI NEUTRON

WAGNER⁴¹ (apare, ca personificare a experimentatorului ideal, ținând în echilibru pe vârful degetului o minge neagră, și recită cu mândrie):



Neutronul a ajuns să existe, el este încărcat cu Masă. Este totuși lipsit de sarcină, Pauli, ești de acord?



MEFISTO: Ceea ce experiența a găsit — deși teoria nu are nici o contribuție — este întotdeauna recunoscut a fi mai mult decît valabil pentru a fi înfipt în mintea și în inima noastră. Noroc, tu Ersatz de categorie grea, îți urăm bun venit cu plăcere! Dar pasiunea toarce mereu intriga noastră, și Gretchen este comoara mea!

COR MISTIC: Azi o realitate, înainte doar o viziune. Ce clasicism, grație și precizie! Salutăta cu cordialitate, onorată în imnuri, *Eternă Neutralitate*, ne trage înainte.





Una din conferințele de primăvară tipice de la Copenhaga (1932) la care a fost jucată piesa Faust (O parodie). În rîndul din față: N. Bohr, P.A.M. Dirac, W. Heisenberg, P. Ehrenfest, M. Delbrück, Lisa Meitner și multe alte creiere (ghiciți-le) în rîndurile din spate. (Autorul acestei cărți nu a participat la conferință.)



Institutul Internațional de Fizică Solvay, Congresul al VI-lea de fizică, octombrie 20—26, 1930.

Primul rînd: Th. De. Donder, P. Zeeman, P. Weiss, A. Sommerfeld, Doamna Curie, P. Langevin, A. Einstein, O. Richardson, B. Cabrera, N. Bohr, W. J. De Haas. Rîndul doi: E. Herzen, E. Henriot, J. Verschaffelt, Manneback, A. Cotton, J. Errera, O. Stern, A. Piccard, W. Gerlach, C. Darwin, P. A. M. Dirac, H. Bauer, P. Kapița, L. Brillouin, H. A. Kramers, P. Debye, W. Pauli, J. Dorfman, J. H. Van Vleck, E. Fermi, W. Heisenberg (Fotografiat de Benjamin Couprie)



Institutul Internațional de Fizică Solvay, Congresul al VII-lea de fizică, Bruxelles, octombrie 22—29, 1933.

Primul rînd: E. Schrödinger, Doamna I. Joliot, N. Bohr, A. Joffe, Doamna Curie, O. W. Richardson, P. Langevin, Lord Rutherford, Th. De Donder, M. de Broglie, L. de Broglie, Domnișoara L. Meitner, J. Chadwick. Rîndul doi: E. Henriot, F. Perain, F. Joliot, W. Heisenberg, H. A. Kramers, E. Stahel, E. Fermi, E.T.S. Walton, P.A.M. Dirac, P. Debye, N.F. Mott, B. Cabrera, G. Gamow, W. Bothe, P. Blackett, M.S. Rosenblum, J. Errera, Ed. Bauer, W. Pauli, J.E. Verschaffelt, M. Cosyns (în spate): E. Herzen, J.D. Cockroft, C.D. Ellis, C. Peierls, Aug. Piccard, E.O. Lawren-

Prolog

1. Sferele politropice sînt modelele matematice ale sferelor gazoase fierbinți, care sînt stelele.
2. Abatele Georges Lemaitre, un astronom belgian care a formulat Teoria Universului în Expansiune.
3. ... cu forme de pară. Teoria lui Jeans asupra originii stelelor duble.
4. „Monthly Notices“ ale Societății Regale Astronomice, în care se publică majoritatea articolelor engleze de astrofizică teoretică.
5. Gazul electronic degenerat al lui Fermi constituie interiorul stelelor de o anumită clasă (vezi capitolul VII).
6. Un simbol care caracterizează relația de nedeterminare $\Delta q \cdot \Delta p$ din mecanica cuantică teoretică, semn ce va fi întîlnit ulterior în text.
7. Criticul. Profesorul Ehrenfest avea o atitudine critică față de multe idei teoretice, în particular față de ipoteza lui Pauli a neutrino-ului.
8. *Jah, muss Ich sagen* ... Limba curentă acceptată în Institutul lui Bohr era în mare măsură germană, datorită numeroșilor participanți din Europa Centrală. Bohr o vorbea perfect, adesea însă cu danisme. Una din expresiile tipice era „*muss Ich sagen*“ („trebuie să spun“)

care în germana corectă ar fi trebuit să fie „*darf Ich sagen*“ („aș putea să spun“). Explicația constă în faptul că în daneză „*darf*“ este „*maa*“, care este mai aproape de germanul „*muss*“ sau de englezescul „*must*“.

9. „*maa jeg spørge*“ înseamnă în daneză „aș putea să întreb“.
10. „... nu ca să critic, ci“ una din expresiile tipice ale lui Bohr, pe care acesta o utiliza ori de câte ori nu era de acord cu afirmația cuiva.

Partea întâi

11. X-erie („*Ixerei*“, în germană) este un cuvânt inventat de Einstein și care a fost utilizat adesea cu referire la articolele care conțineau prea multă matematică complicată („*x*“ reprezintă în algebra școlară necunoscuta) și puțin conținut fizic.
12. E. Guth (semnifică „bine“) și G. Breit (semnifică „larg“).
13. Fizicianul german F. Hund (înseamnă „ciine“) a cărui nume era adesea utilizat în expresia: „lucrând ca un ciine“.
14. Fizicieni germani care lucrau în domeniul Teoriei cuantice a Radiației.
15. Psi-Psi Stern (Psi-Psi stelat, $\psi\psi^*$) este o mărime importantă în fizica cuantică. Aici, cu referire la Otto Stern și W. Gerlach, experimenatori binecunoscuți.
16. Raze beta. Conform ipotezei lui Pauli, neutrino-ul este o particulă care însoțește întotdeauna emisia unei raze beta din nucleu.
17. Spinul N-ului. Potrivit concepțiilor timpului respectiv, spinul nucleului (rotația axială) de nitrogen nu putea fi explicat fără luarea în considerare a spinului neutrino-ului ipotetic.
18. Referire la Universitatea din Michingan, la Arn Arbor, Michingan.
19. Puricele Monarhului (Einstein) este Teoria relativității generale.
20. Walter Mayer — se pronunță „Myer“ (rimează cu „Sir!“) care a lucrat ca asistent al lui Einstein la dezvoltarea teoriilor acestuia.

21. Tensorii sînt simboluri matematice utilizate în teoria spațiilor cu curbura.
22. Fiul este teoria unitară a cîmpului la care Einstein a lucrat, fără prea mult succes, ultimele trei decenii din viața sa.

Partea a doua

23. Camere Wilson etc. Aparate fizice folosite în studiul razelor cosmice.
24. W. Heisenberg (vezi capitolul VI) care în perioada respectivă lucra la Teoria razelor cosmice.
25. Bruno Rossi și G. Hoffmann, experimențatori care studiau razele cosmice.
26. Leon Rosenfeld, un fizician teoretician belgian.
27. „Invariantul de calibrare“, o noțiune complicată a fizicii teoretice. În germană „Eiche invariant“. Prin coincidență, cuvîntul german „Eiche“ semnifică și „stejar“.
28. Landau. *Vezi Niels Bohr and the Development of Physics* (Niels Bohr și dezvoltarea fizicii) de W. PAULI, New York, Mc.Graw-Hill Book Co., Inc., 1955, p. 70.
29. Golurile lui Dirac (pentru explicație, vezi capitolul VII).
30. Monopolul (pentru explicație, vezi capitolul VII).
31. Teoria grupurilor, o ramură complicată a matematicii, folosită în teoria cuantică.
32. Semnul Fals se referă la punerea unui + în locul unui — , sau invers, o greșeală comisă deseori din neatenție în calculele matematice, și care conduce desigur la rezultate false.
33. Relația de schimb. Postulatul de bază în mecanica cuantică a lui Heisenberg.
34. Electroni-măgari. Denumire glumeață a electronilor cu masă negativă (vezi capitolul VII).
35. Un foton, sau o cantă de lumină, poate fi considerat ca un pachet de energie în rotație.
36. Referitor la bosoni (vezi capitolul VI).
37. Constanta Structurii Fine. Numărul 137, important în teoria atomului.

38. Energie negativă. Una din dificultățile matematice care apar în teoria cuantică.
39. Singularitate. Altă dificultate matematică care apare în teoria cuantică.
40. Mecanica ondulatorie a fost descoperită în anul 1926.

Final

41. Wagner. James Chadwick, fizicianul englez care a descoperit neutronul (o particulă neutră grea) în anul în care a fost jucată această piesă.
42. Ersatz. Neutronul, cu masa lui mare, nu poate fi considerat ca un substitut („Ersatz“) pentru neutrino, care este lipsit de masă.

Numerele italice se referă la numerele figurilor din text

- Academia Regală Daneză de Știință**, 56
- Adunare și scădere, lege de**, 99
de matrici, 100 — 103
- Algebră necomutativă**, 15, 101 —
— 103
- Alfa particule**, 41—44, 74, 94—97
Condon și Gurney, 8
formula, Fowler, 133
mișcarea 95-96
aparatul lui Rutherford 10,
experiența, 94
difuzia, 42, 133
- Analiza materiei**, Russell, 149
- Anderson Carl**, 145
experiența lui, 128
- Anti-particule**, 16, 82, 115—132,
145, 146
experiența, 131 — 132
teoria, 16, 127 — 132, 146
- Aristotel**, 126
- Aspecte matematice ale Fizicii**,
Bitter, 119
- Atkinson Robert**, 8, 97
- Atomic, Nucleul**, G. Gamow, 9
- Atomice, modele**, 13, 14, 72
Bohr, 12, 14, 48, 65, 12, 19
de Broglie, 90
Heisenberg, 99
Pauli, 72
Rutherford, 14, 41 — 44, 45
Schrödinger, 90, 21
Thomson, 39 — 44
- Atomice, volume**, 70 — 72
modificări ale, 15
- Atomii la noi acasă**,
L. Fermi, 148
- Azimutal (e)**, 53, 72
linii nodale, 90, 21e
vibrații, 90, 21d
- Balmer, J.J.**, 48, 49, 12
formula lui, 48—51, 52—53, 9a
- Barieră de potențial**, 94 — 97
- Beta, difuzia, teoria**,
Fermi, 134 — 139, 142, 157

- Beta, emisia, teoria,
Fermi, 135
- Beta, transformarea,
teoria matematică, a, Fermi,
135—136
- Bethe, H., 138
- Bevatron, 129
- Bitter Francis, 116, 119
- Bjerknes, 62
- Bohr, Harald, 62
- Bohr, Niels, 1, 2, 11, 12, 13, 14,
15, 27, 28, 38 — 66, 69, 72,
74 — 78, 83, 84, 93, 111—114,
115, 128, 139, 11, 18, 25
- Faust*, piesa, 59, 155, 157, 158,
160 — 196
- Institutul, 12, 13, 56 — 66, 158
- modelul atomic, 12, 13, 14, 48,
72, 12, 19
- teoriile lui, 28, 92, 115, 146
- Boltzmann, Ludwig, 17, 58, 77, 78
- Boltzmann, constanta lui, 77, 78
- Bondi, H., 121
- Brackett, Frederick, 49, 12
- Bragg, W. și Bragg W.L., 86
- Broglie, Louis Victor de, 14,
15, 83 — 97
- modelul atomic, 90
- unde pilot 14, 83 — 90, 95,
98, 111, 19, 20
- Browniane(ă) particule, 24
- mişcare, 108
- Carlsberg:**
- bursa, 56, 61
- castelul, 56 — 57
- fabrica de bere, 56
- laboratorul de cercetări, 56
- Cartesian, sistem de coordonate,
111
- Casimir, H., 58, 59, 62
- Catastrofa ultravioletă, 26, 28, 45
- Ceață, camere de, 110, 138
- Chadwick, James, 157 — 158,
161 — 196
- descoperirea neutronului, 78
- experiențele lui, 76, 135, 17
- Cinetică, energie, 18, 19
- Cinetică, teorie a căldurii, 17
- „Clopoței“, metoda, 110
- vezi și Ceață, camere de,
- Clausius, Rudolph, 27
- Compton, Arthur, 13, 36
- experiențele lui, 13, 36, 8,
- Compton, efectul, 36—37
- Condon, E.U., 8, 60, 94
- Converi, M., experiența lui 145
- Cosmotron, 129
- Coulomb, Charles de, 38, 44, 69,
94, 123, 127, 142,
- Cowan, C., 79, 133, 158
- Crimă și pedeapsă*, 118
- Critchfield, Charles,
reacția H—H, 138
- Cuante de lumină, 13, 17 — 36, 41
- Darwin, C., 160 — 196**
- Davisson, G., 86
- Delbrück, Max, 58, 61, 160 — 196
- Derivate:
- de ordinul unu, 119 — 121
- de ordinul doi, 119 — 121
- Diagrame:
- Bohr — Coster, 18a
- Mayer — Jensen, 18b
- Dimensională:
- analiza, 147 — 149
- formula, 147 — 149
- Dirac, P.A.M., 15, 58, 74, 82,
115 — 132, 141, 148, 149,
160 — 196, 28
- experiențe, 128

- ecuația liniară, 121 — 123
 teoria anti-particulelor 128 —
 — 1
 unificarea teoriilor relativității și cuantice, 148
 unificarea mecanicii ondulatorii și a relativității speciale, 146
- „Divergențe“, 150—151
- Dostoievski, 118
- Eddington, A., 162
- Ehrenfest, Paul, 59, 78, 158, 160 — 196
 mecanica statistică, 59
 teoria invariantilor adiabatici, 59
- Einstein, Albert, 11, 13, 28, 31, 34, 36, 44, 45, 55, 57, 105 — 107, 120 — 125, 133, 148
 și Bohr, discuția, 111—114, 25
 Teoria relativității generale, 44, 126
 efectul fotoelectric, 31 — 36
 două legi ale, 33 — 34
 formula 34
 Legea conservării masei și energiei, 76, 78, 123, 129, 151, 158
 mecanica relativistă, 122
 teoria relativității 28, 45, 104
- Electrodinamică, 63, 148
- Electromagnetică,
 teoria emisiei, clasică, 44
 Electromagnetică, energie cuantificată, 45
- Electromagnetice, unde, 20, 33, 83, 92, 108, 111, 119, 136
 energie a, 28
 scurte, 20
 oscilații, 20
- Electronii, nivele, cote pentru, 69 — 72, 15
- Electronul cu spin, 115 — 116, 121 — 123, 125
 vezi și spinul electronului
- Energie, pachete de,
 vezi cuante de lumină
- Energie radiantă, 13, 23, 25 — 26, 28, 107, 112 — 114
- Echipartiție, legea de, 18, 19, 20, 21 — 23, 26, 29, 4
- Euclid, 105, 108
- Excludere, principiul de vezi Pauli, principiul lui
- Experiența:
 Anderson, 128
 Chadwick, 76
 Compton, 13, 36
 Converi, 145
 Cowan, 138, 158
 Davisson, 86
 Dirac, 128
 Fermi, 64 — 65, 139
 Fermi, butelia lui, 139—141, 29
 Frisch, 65
 Germer, 86
 Hahn, 64 — 65
 Heisenberg, 105 — 108, 24
 Helmholtz, von, 91 — 92
 Michelson, 104
 Pancini, 152
 pianului, comparație cu, 25, 4
 Piccioni, 152
 Planck, 34
 Reines, 138, 158
 Rutherford, 43, 10
 Stern, 86 — 87
 strunei, 21, 8
 Thomson, G., 86
 Thomson, J. J., 38 — 41
 Tuve laboratorul, 65

Experiment mental, Gedanken-
experiment, 23

Faust, 59, 160 — 196

Fermi, E., 133 — 141, 145, 158

Atomii la noi acasă, 148

constanta g , 136, 143, 146

experiențe, energie nucleară,
64 — 65, 139

gaz electronic degenerat,
studiul, 134

interacțiuni slabe, 145

teoria transformării

particulelor, formularea 133 —
— 139

Fermi, butelia lui,

experiența, 139 — 141, 29

Feynman, Richard, 152

Fină, structură, constantă 55, 160

Fisiune, reactor de, 140

Fizică nucleară, Pauli, 74 — 78

Formula, Rutherford a difuziei
particulelor alfa 133

Fotoelectric, efect, 31 — 36

experiențe, 6, 31

legile, 33, 7

Einstein, 34

Fowler, R.H., 89, 133, 160 — 196

Franck, J., 68 — 69

Frisch, Otto, 65

Gamow, Barbara, 158

Gamow, George, 26, 58 — 63, 64,
79, 88 — 89, 94, 158, 160 — 196

Gravitatea 119, 149

lista de titluri de cărți, 9, 10

premiul Kalinga, 10

scrisoarea lui Pauli către, 152,
81

Geissler, Heinrich, 46

Geissler, tuburi, 46

Gell-Mann, 152

Germer, L.H., 86

Gibbs, Josiah Willard, 17

Gordon, W., ecuația de undă, 121

Goudsmit, Samuel, 73, 116

Gravitatea universală, teoria, 133

Gurney, R.W., 8, 60, 94

Hahn, Otto, 65, 139

experiența lui, 64 — 65

Hamilton, principiul acțiunii
minime, 30

Heisenberg, Werner, 15, 58, 98 —
114, 149, 150, 151, 31

algebră necomutativă, 15

experimentul lui, 105 — 108, 24

mecanică matricială, 98 — 104

microscop cuantic, 24

model atomic, 98

Principiile Fizice ale

Teoriei Cuantice, 149

principiul de nedeterminare,
98 — 114

formularea, 63

Heitler, W., 143, 30

Helium, atomi de, 41 — 42, 74

Helmholtz, Hermann von, 27,
91, 92

experiența lui, 91 — 92

H — H, reacția, 138

Houtermans, Fritz, 8, 97

Hidrofluoric, acid, 23

Hidrogen, 14, 18 — 19, 23, 72,
138, 141, 143, 30

Hidrogen, atomul de, 47 — 50, 55,
69, 92, 138, 143, 12

ecuația liniară a lui Dirac,
121 — 123

orbitele, 38 — 66, 115, 13

teoria lui Bohr, 145

Hyperoni, 131

- Interacțiuni, legi de,**
 Fermi, 137—139, 144, 145
 constanta de, Fermi, 138, 145, 146
 constanta de, Yukawa, 145
 generală, Fermi 139
- Interacțiuni slabe, 137, 143**
- Ivanenko, D., 143**
- Jaffe, B., *Michelson și viteza luminii*, 45**
- Jeans, Sir James, 19, 20, 24, 28, 162**
 formula lui, 20, 30
 și analogia pianului, 25, 4
- Jeans, cubul lui, 23, 25, 26, 28, 112**
- Jensen, Hans, 80, 81, 93, 18b**
- Kant, Immanuel, 104**
- Kapitza, Piotr, 118**
- K-captură, procesul de, 137—139**
- Kepler, legea a doua, 55**
- Kirchhoff, Gustav, 27**
- Klein, O., 58, 62**
 formula, 121
 ecuația de undă, 121
- Kramers, H.A., 58**
- Landau, L. 58, 160—196**
- Lanț, reacție în, prima 139**
- Linderstrøm, Lang, 56**
- Linii matematice lățite, 111**
- London, F., teoria**
 forțelor de schimb, 143, 80
- Lucru de ieșire, 34**
- Lyman, Theodore, 49, 12**
- Magellan, 104**
- Magice, numere, 80—82**
- Magneții, Bitter, 116**
- Matrici, 99—104**
- Masă negativă, 123—126, 128—131, 26, 27b**
- Maupertuis, P.L.M., 52**
- Maxwell, James C., 17, 18, 77**
 curbele lui, 18, 1
- Mayer, M. Goepfert, 80, 81, 93, 18b**
- Mecanică clasică, vezi Newton, mecanică clasică**
- Mecanică ondulatorie, 8, 15, 60, 63, 92—97, 98—99, 104, 23**
 ecuația, 15, 104, 119—121
- Mecanică statistică, legea de bază a, 18, 19, 58**
- Meitner, Lise, 65, 139**
- Mendeleev, D.I., 72**
- Mendeleev, sistemul periodic al lui, 79**
- Mesoni, 131, 142, 144—145**
- Michelson, A.A., 45**
 experiența lui, 104
- Michelson și viteza luminii*, 45**
 Jaffe, 45
- Millikan, Robert A., 31, 160—196**
- Milne, E.A., 162**
- Minkowski, H., 120**
- Miuoni, 145, 146, 147**
- Mott, N.F., 58**
- Neddermeyer, S., 145**
- Neutrino, 78—82, 134—139, 143, 146, 158, 160—196**
 anti-, 136
- Newton, Sir Isaac, 28, 44, 99**
 constanta gravitației, 44, 148—149
 legea gravitației universale, 26, 44, 133
 legea mișcării, 120

- ecuația, 120
 mecanica clasică, 18, 19, 38, 39, 95, 96, 97, 98—104, 109, 111, 119, 120, 148, **23**
 ecuațiile, 51, 103, 119
 newtonian, conceptul de spațiu și timp, 11
 Nishina, Y., 58, 117—118
 formula lui, 118
 Nobel, premiul,
 Dirac, 116
 Fermi, 139
 Planck, 28
 Nuclei atomici, teoria,
 Rutherford, 41—44
 Număr cuantic principal, 55
 Oppenheimer, J. Robert, 58, 160—196
 Orbite, 33—66, 115
 circulare, 44, 50, 51, 52, 53, 54, 92—93, **13**
 ale electronilor, 83—84, 110
 cliptice, 44, 53—56, 92—93, **13**
 energia, 54
 cuantice, 15, 38—66, 69, 72, 74, 83—85, 94, 110, **13, 19**
Originea elementelor chimice, Gamow, 9
 Pancini, E., experiența lui, 152
 Particule:
 traectoria, 110
 transformări, 133—141
 vezi și anti-particule
 Paschen, Friederich, 49, 12
 Pauli, Wolfgang, 58, 59, 67—82, 151—152, 153, 157, 160—196
 efectul, 68, 133
 modelul atomic, 72
 neutrino, 73—74, 158
 principiul lui, 68—82, 125, **15, 16a**
 modificat, 74, **16b, 16c**
 al doilea, 128
 scrisoarea către Gamow, **31, 152**
Teoria Relativității 68
 loc vacant, 126
 Pește de adinc, 126
 Pianul, 39
 și cubul lui Jeans, 24—25, **4**
 Piccioni, O., experiența lui, 152
 Pioni, 145, **30**
 Planck, Max, 7, 8, 11, 13, 15, 16, 17—37, 41, 45
 Autobiografie științifică, 27
 constanta h , 30, 85, 136, 148
 curbe teoretice 30
 Legea a doua a termodinamicii, 27
 legea cuantelor de lumină, 28
 formula lui, 30
 fototelectric efectul, 31—36
 Noțiunea de Cauzalitate în Fizică, 27
 Premiul Nobel, 28
 teoria cuantică, 28—29, **5**
 teoria radiației — termodinamică, 27
 Planckiana, asteroid, 28
 Planck, constanta lui, sau constanta cuantică, 30
 Poincaré, Henri, 149, 151
 Powell, C.F., 145
 Prima și a doua lege a mișcării, Newton, 120
 Principiul de nedeterminare,
 Heisenberg, 98—114
Principiile fizice ale teoriei cuantice, Heisenberg, 149
Principiile matematice ale filozofiei naturale, Newton, 99

- Principiul minimei acțiunii,
Maupertuis, 52
- Pytagora, 149, 151
- Radiație**, 19, 20, 31, 76, 112
cuantă,
frecvență, 20, 21, 22
infraroșie, 20
presiunea, efect al, 107
termică, 20
ultravioletă, 20
- Rayleigh, Lord, 19, 20, 28
formula lui, 20, 30
- Reacții termonucleare, 97
- Reines, Fred, 79, 138, 158
- Relativitatea generală, teoria, 11
- Relativitatea specială, teoria, 11
- Relativitatea și Bunul Simț*,
Bondi, 121
- Ritz, W., 47
- Rosenfeld, L., 58, 63
- Rosseland, S., 58, 62
- Russell, Bertrand, 151
Analiza Materiei, 149
- Rutherford, Lord Ernest, 14, 41,
42, 43, 44, 74, 88
aparatură, 10
modelul atomic, 14, 41—44
particulele alfa, 41—44
experiența, 10, 42, 95
formula difuziei, 133
primele studii ale reacțiilor
nucleare, 63—64
teoria nucleului atomic, 41—44
- Rydberg, constanta R., 48, 146
- Rydberg, regula lui, 11
- Savannach River, Proiectul
Comisiei pentru Energia Ato-
mică, 79
- Schrödinger, Erwin, 15, 97, 98,
111
ecuațiile, 89—92, 103, 115, 119,
120, 143, 22
mecanica ondulatorie nerela-
tivistă, 15, 120
ecuația, 121
mecanica ondulatorie, teoria, 15
articolul despre, 98, 103
modelul atomic, 90
- Schwinger, Julian, 152
- Segre, Emilio, 130
- Slater, J.C., 58, 160—196
- Snell, legea lui, 95, 23
- Solberg, 62
- Sommerfeld, Arnold, 27
formula, 53—54
orbitele eliptice, 53—56
- Spectru, spectre, 15, 38—40, 45,
55, 133
energia particulelor beta, 76,
13 17
helium, 9
hidrogen, 9, 48
linii spectrale, 14, 15, 39,
47—49, 55, 73, 98, 103, 121
raze beta, 41, 78
- Spin, vezi electronul cu spin,
- Stern, Otto, experiența lui,
86—87
- Strassman, Fritz, 139
- Studii asupra gazului electronic
degenerat, Fermi, 133
- Tamm, I., 143
- Teller, Edward, 65
- Teodolit, 105—107
- Teoria Relativității, Einstein, 11,
19, 45, 76, 105, 115, 116, 119,
120, 123, 148
- Teoria Relativității*, Pauli, 68

- Termică, mișcare, 17
- Termodinamică 28—29
- Thomson, Sir George, 86
- Thomson, J.J., 38—41, 86
 - modelul atomic, 38, 39, 42—43
 - experiențele, 38—41
- Tolman, R.C., 58, 160—196
- Traietorie, 52, 53, 104—108
 - experiență, 104—106, 24
 - liniară, 104, 111
- Transformarea particulelor,
 - teoria, Fermi, 133—141
- Tuve, Merle, experiența, 64—65

- Uhlenbeck, George, 73, 116
- Unificarea teoriei relativității
 - cu teoria cuantică, 15, 115, 119—127

- Uranu, 95
 - izotopii, 81
 - modelul atomic, 79
 - nucleul, 97
 - prima reacție în lanț, 139

- Weizsäcker, Carl von, 58, 138
- Wells, H.G., *Omul invizibil*, 138

- Yukawa, Hideki, 142—145
 - constanta y , 143—145
 - mesonii, 142—144
 - teoria interacțiunilor tari, 145

- Zeeman, efectul, 73

CUPRINSUL

<i>Notă biografică</i>	7
<i>Prefață</i>	11
<i>Introducere</i>	13
Cap. 1. M. PLANCK ȘI CUANTELE DE LUMINĂ.....	17
Mecanica statistică și radiația termică. Max Planck și cuanta de energie. Cuantele de lumină și efectul fotoelectric. Efectul Compton.	
Cap. 2. N. BOHR ȘI ORBITELE CUANTIFICATE.....	38
Teoria lui Rutherford asupra nucleului atomic. Cuantificarea unui sistem mecanic. Orbitele eliptice ale lui Sommerfeld. Institutul lui Bohr	
Cap. 3. W. PAULI ȘI PRINCIPIUL DE EXCLUDERE	67
Cote pentru nivelele electronilor. Electronul cu spin. Pauli și fizica nucleară. Neutrino-ul.	
Cap. 4. L. DE BROGLIE ȘI UNDELE PILOT	83
Ecuația de undă a lui Schrödinger. Aplicarea mecanicii ondulatorii	
Cap. 5. W. HEISENBERG ȘI PRINCIPIUL DE NEDETERMINARE	98
Renunțarea la traiectoriile liniare clasice.	

Cap. 6. P.A.M. DIRAC ȘI ANTIPARTICULELE	115
Unificarea relativității cu teoria cuantică. Fizica antiparticulelor	
Cap. 7. E. FERMI ȘI TRANSMUTAȚIA PARTICULELOR	133
Forțele care determină transformările β . Folosirea legi- lor de interacțiune ale lui Fermi. Cercetările lui Fermi în domeniul reacțiilor nucleare	
Cap. 8. H. YUKAVA ȘI MEZONII	142
Cap. 9. LA LUCRU	146
APENDICE <i>Faustul</i> de la Blegdamsvej	155
<i>Indice</i>	197

Redactor : AUREL JOLTEA

Tehnoredactor : MIRCEA NASTA

**Coli editură : 10,28. Coli de tipar 13 + 12 pagini
plânse. Hirtie tipar înalt tip A 63 g/m². Indici
de clasificare zecimală : pentru bibliotecile
mari : 53, pentru bibliotecile mici : 51.**

**Tiparul executat sub comanda nr. 90 175 la
Combinatul Poligrafic „Casa Scinteli“, Piața
Scintei nr. 1, București — Republica Socialistă
România**

